Energie-Umsetzungen während der Keimung von Weizenkörnern

von

Lucie C. DOYER.

EINLEITUNG.

Wo wir auch das materielle Leben betrachten, sei es im Pflanzen- oder Tierreich, bei den höchst organisierten oder bei den niedrigsten Organismen, da treffen wir wohl immer als das Wesentlichste die fortwährende Abwechslung von Energie-Aufnahme und -Abgabe an. Einerseits wird die Energie in den Organismus als aufgenommene Nahrung eingeführt; bei der Kohlensäure-Assimilation entstammt andererseits die Energie direkt vom Lichte. Diesem Assimilationsprozess steht immer der, der Dissimilation gegenüber; die aufgenommene Energie wird wieder frei und zu zahlreichen Lebensvorgängen angewandt.

Es sind gerade diese Energieumsetzungen, die ich zum Gegenstand der hierfolgend beschriebenen Versuche gewählt habe, und speziell diejenigen, welche in Weizenkörnern während der Keimung im Dunkeln stattfinden. Diese Experimente wurden im Botanischen Institute in Utrecht ausgeführt. An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit benützen Herrn Professor Went nochmals meinen verbindlichsten Dank auszusprechen für das Interesse, das er stets an meiner Arbeit genommen und für die freundliche

Weise in der er mir über die Schwierigkeiten, die sich mir dabei entgegenstellten, hinweg geholfen hat.

Während der Reifung des Korns ist in demselben eine grosse Menge Reservestoffe aufgespeichert worden, und diese aufgespeicherte Energie steht dem Keimpflänzchen zur Verfügung, sobald es dieselbe zur ersten Entwickelung braucht.

Während der Ruhezeit ist der trockene Samen in diesem Zustande unverändert liegen geblieben; die Atmung ist so äusserst schwach, dass diese keinen nennenswerten Energieverlust verursacht. Die Keimung fängt mit Wasseraufnahme an; bei dieser Imbibition wird Wärme, also Energie, frei. Findet nun die Keimung im Dunkeln statt — wie das bei meinen Versuchen immer der Fall war — so ist eine Energie-Aufnahme von draussen mittelst Kohlensäure-Assimilation ausgeschlossen; die ganze, zur weiteren Entwickelung nötige Menge Energie wird von den Reservestoffen geliefert. Diese fangen auch alsbald an sich in weniger hoch-molekulare Verbindungen umzuwandeln, und auch die Atmung wird vom Anfang der Keimung an stets kräftiger. Dieses sind schon zwei Prozesse, vermittelst welcher frei gewordene Energie zur Verfügung kommt.

Einesteils wird diese Energie entweder für synthetische Prozesse angewandt, welche Baumaterial für die wachsende Pflanze liefern, oder für das Zustandekommen osmotischen Druckes, oder zur Überwindung innerer oder äusserer Widerstände, derjenigen, zum Beispiel, welchen die Wurzel beim Wachsen begegnet etc. etc.

Anderenteils wird die frei-werdende Energie als Wärme an die Umgebung abgegeben, entweder als notwendiger aber schädlicher Verlust, oder als unumgängliche Lebensbedingung. Im hiesigen Falle, bei den keimenden Weizenkörnern — wie im Pflanzenreich im Allgemeinen — wird diese Wärme-Abgabe vielleicht eher als ein Verlust, als wie eine unumgängliche Lebensbedingung aufzufassen sein,

denn nur in sehr wenigen Ausnahmefällen ist diese freikommende Wärme im Stande die Pflanze auf eine höhere Temperatur als die der Umgebung zu bringen, und wenn dieses doch der Fall ist, so ist es nur für sehr kurze Zeit und auf eine sehr wechselnde Temperatur im Bezug auf die Bedingungen der Umgebung. (Feuchtigkeitsgehalt der Luft, etc.).

Um nun zu einer richtigen Vorstellung dieser Energie-Umsetzungen während der Keimung zu gelangen, kann man verschiedene Wege einschlagen.

Diese sind:

1. Die Verbrennungswärme des Samen sowohl vor der Keimung zu bestimmen, wie nachdem diese eine bestimmte Zeit fortgeschritten ist.
2. Das Volumen ausgeatmeter Kohlensäure zu bestimmen, und zu berechnen wieviel Wärme bei der vollständigen Oxydation des Atmungsmaterials zu diesem Volumen Kohlensäure frei geworden sein musz.
3. Die frei gewordene Wärme direkt mittelst Temperatursteigerung zu messen.

Der Wert und der Zusammenhang dieser drei Methoden zur Bestimmung der während der Keimung stattfindenden Energie-Umsetzungen, werden in dem eigens gewidmeten Kapiteln betrachtet werden. Gerade mit dieser dreifachen Weise der Energiebestimmung ist ein grosser Vorteil verbunden; sie gibt nämlich einen Blick auf Energiemengen, die nicht identisch sind, sich aber ganz gut ergänzen und führt somit zu einer besseren Einsicht in die gegenseitigen Energieverhältnisse.

Der Energieverlust während der Keimung, vermittelst der Verbrennungswärme berechnet.

Bevor ich die Experimente zur Bestimmung der Verbrennungswärme bespreche, will ich hier kurz auseinandersetzen wie diese sich zum Energieverlust verhält.

Während der Keimung werden die, in dem Samen aufgespeicherten Reservestoffe, die, von welcher Zusammensetzung sie sonst auch sein mögen, stets hoch-molekulare Verbindungen sind, in Verbindungen von einer kleineren Anzahl Atome oder zum Teil sogar ganz in Kohlensäure und Wasser aufgespalten.

Bei diesen exothermischen Prozessen wird, wenn sich sonst keine Einflüsse geltend machen, die frei gewordene Wärme durch Austausch mit der Umgebung abgegeben werden. Diesen Prozessen stehen aber eine Menge endothermischer Reaktionen gegenüber; die Umwandelungsprodukte werden nämlich zum Teil nach Stellen transportiert, wo sie zum Aufbau der neuen Pflanze, d. h. zur Bildung von Zellwänden, Protoplasma etc., wieder aufgebraucht werden. Aus weniger komplizirten Verbindungen werden also wieder höher-molekulare rückgebildet. Bei dem Zustande-kommen dieser Prozesse wird die, bei den exothermischen Prozessen freigewordene, Wärme also teilweise wieder festgelegt.

Ein anderer Teil der freigewordenen Energie wird zur Überwindung innerer und äusserer Widerstände und zur Entstehung osmotischen Druckes angewandt.

Die ganze Quantität der, bei der Keimung freigewordenen,

Energie übertrifft aber diejenige, welche ausschliesslich zum Gange der Lebensprozesse benötigt ist, denn aus der Temperatur-Steigerung der Keimpflanzen darf man wohl mit Recht auf einen Überschuss freier Energie schliessen, der als Wärme abgegeben wird.

Bestimmt man die Verbrennungswärme von Samen und Keimpflanzen, so wird man also finden, dass diese bei der Keimung abnimmt. Dieser Energieverlust stimmt also überein: 1. Mit der als Wärme abgegebenen Menge Energie. 2. Mit der zu osmotischen Zwecken und 3. Zur Ueberwindung von Widerständen angewandten Menge.

Diejenige Energie, die während der Keimung benutzt worden ist, die neue Pflanze zu bilden, und als chemische Energie festgelegt ist, wird von dem Unterschied der Verbrennungswärmen nicht angegeben. Wie gross diese Menge Energie also gewesen ist, die eine so bedeutende Rolle während der Keimung gespielt hat, kann man aus der Verbrennungswärme nicht schliessen.

Die Verbrennungswärme wurde mittelst einer Berthelot'schen Bombe bestimmt. Herr Professor Cohen hat die Güte gehabt mir in seinem van 't Hoff Laboratorium einen Platz zu überlassen und mir die zu der Bestimmung nötigen Hilfsmittel freundlichst zu gewähren.

In dieser Berthelot'schen Bombe wird der zu untersuchende Stoff unter hohem Sauerstoff-Drucke (von 20 Atm.) verbrannt, während man die Temperaturerhöhung des Wassers, von welchem die Bombe umspült ist, misst. Hat man zuvor die, von der freigewordenen Wärme-Einheit verursachte, Temperaturerhöhung des Wassers bestimmt, so kann man aus jeder willkürlichen Temperaturerhöhung die Quantität freigekommener Wärme berechnen. Für weitere Einzelheiten der Vorrichtung weise ich auf Ostwald Luther, Physiko-chemische Messungen. 3. Auflage 1910, Seite 327, hin.

Zuerst musste also die Bombe geaicht werden; dieses

geschah mittelst Verbrennung einer abgewogenen Menge Naphtalins (Verbr. W. 9668 Kal. pro Gr.). Die Wärmekapazität der Bombe wurde auf diese Weise auf 705,1 bestimmt.

Nachdem diese Wärmekapazität bekannt war, konnte zur Verbrennung der Weizenkörner übergegangen werden. Die Verbrennungswärme derselben wurde sowohl vor der Keimung bestimmt wie nachdem diese einige Zeit fortgeschritten war; der Unterschied in den Verbrennungswärmen gab also den Energieverlust während der Keimung an.

Bevor diese Bestimmungen besprochen werden, müssen noch einige Bemerkungen über die Bedingungen, unter denen die Keimung stattfand, vorangehen.

Die für die Untersuchungen bestimmten Weizenkörner wurden immer zuerst ungekeimt und lufttrocken gewogen. Dieses Gewicht vor der Keimung wird bei den Beschreibungen der Experimente als das „Anfangsgewicht" bezeichnet.

Die Keimung fand in einem gläsernen, mit Wasser gefüllten Gefässe statt; dazu wurde auf das Wasser ein hohler gläserner, mit Gaze überspannter Ring gelegt. Dieser Ring ruhte auf der Oberfläche des Wassers in solcher Weise, dass die Gaze gerade auf dem Wasser lag. Auf diese Gaze wurden die trocknen, zuvor nicht mit Wasser imbibirten Weizenkörner gelegt. Das Gefäss wurde im Dunkeln in einem Treibhause aufgestellt, in dem die Temperatur ungefähr auf 20° C. gehalten wurde.

Es wäre gewiss von grossem Vorteil gewesen, wenn die Temperatur während der Keimung genau konstant gewesen wäre, denn eine Steigung über, oder eine Senkung unter 20° C. übt natürlich einen ziemlich grossen Einfluss auf die Energieverhältnisse aus. Darum wird das Keimung-Stadium nach einer gleichen Anzahl Tage nicht immer ganz dasselbe gewesen sein. Gross kann dieser Unterschied jedenfalls aber nicht gewesen sein, denn die Temperaturschwankungen waren meistens nicht grösser als von 18° bis 22° C.

Ausserdem aber habe ich die Keimung auch in einem Zimmer des Botanischen Laboratoriums stattfinden lassen, in dem eine konstante Temperatur herrschte; in diesem Falle war die Keimung aber viel unregelmässiger und weniger fortgeschritten als die im Treibhause, wahrscheinlich eine Folge des schädlichen Einflusses des Gases, mit welchem das Zimmer auf konstanter Temperatur gehalten wurde, oder vielleicht auch des zu geringen Feuchtigkeitsgehaltes der Luft. Jedenfalls waren diese Unregelmässigkeiten viel grösser als diejenigen, welche von den Temperatur-Schwankungen im Treibhause verursacht worden waren. Darum waren die Ergebnisse der Keimung im Treibhaus zur Vergleichung weit vorzuziehen.

Bevor die Verbrennung der Weizenkörner stattfand, wurden sie getrocknet. Dieses geschah in einem Trockenofen bei 100° C. Die ungekeimten Weizenkörner und diejenigen, die noch wenig gekeimt hatten, konnten nach dem Trocknen unverletzt auf dem Platin-Löffelchen in die Bombe gebracht werden. War die Keimung der Körner aber schon weiter fortgeschritten, so waren die Würzelchen nach dem Trocknen so leicht zerbrechlich, dass es fast unmöglich war, sie unbeschädigt in die Bombe einzuführen; fielen einige Würzelchen dabei von dem Löffel ab, so war natürlich unvollständige Verbrennung nicht ausgeschlossen. Es war also vorzuziehen diese Keimpflänzchen nach dem Trocknen in einem Mörser zu zermalmen, und sie so zermalmt auf den Löffel zu bringen.

Das Gewicht der, zum Versuche bestimmten Körner (es waren immer 100 zu gleicher Zeit) wurde also jedesmal genau bestimmt, bevor die Keimung anfing. Nachher wurden die im Ofen getrockneten Keimpflanzen von Neuem gewogen. Das Platin-Löffelchen war aber zu klein um diesen ganzen Vorrat zu halten. Das Gewicht der auf das Löffelchen gebrachten Pflanzen musste also auch bestimmt werden, und so war dieses eine bekannte Fraktion

des erstgenannten Trockengewichtes. Die Verbrennungswärme dieses letzteren konnte also einfach durch Multiplikation berechnet werden.

Ebenfalls ist noch die Frage berücksichtigt worden, ob vielleicht das Trocknen bei 100° C. einen Einfluss auf die Energie-Menge ausübte. Man hätte annehmen können, dass, bevor die Enzymwirkung von der gesteigerten Temperatur ganz vernichtet worden war, diese Wirkung vielleicht temporär gesteigert gewesen wäre. Der später konstatirte Energieverlust wäre dann unbedingt grösser gewesen als der, den die Keimung verursacht hatte.

Damit der Einfluss dieser Erwärmung beurteilt werden konnte, wurden die Weizenkörner einer anderen Vorbehandlung unterworfen. Sie wurden nämlich zuerst mittelst Abkühlung in einem Gemisch fester Kohlensäure und Aether abgetötet. Dieses Gemisch befand sich in einem Dewar'-schen Gefässe. Die Keimpflanzen wurden in einem Reagenzrohre in dieses Gemisch gebracht, und so lange in dieser niedrigen Temperatur gelassen, bis man annehmen konnte, dass sie gefroren waren. Nachher wurden sie wieder im Ofen getrocknet. Wenn nach dieser starken Abkühlung die Wirkung der Enzyme noch nicht ganz vernichtet gewesen wäre, so müsste sie wenigstens doch sehr verlangsamt gewesen sein, und bei der folgenden schnellen Erwärmung auf 100° C. wird jedenfalls die Enzym-Wirkung von der hohen Temperatur schon ganz vernichtet gewesen sein, bevor die günstige Temperatur eine merkbare Beschleunigung verursacht haben könnte.

Hätte also die Vorbehandlung einen wahrnehmbaren Einfluss auf den zu bestimmenden Energieverlust ausgeübt, so hätte die nach dieser abweichenden Vorbehandlung gefundene Verbrennungswärme merkbare Unterschiede zeigen müssen, und dieses war nie der Fall. Die Vorbehandlung war also offenbar von geringem Einfluss auf die Resultate. Weil die Vorbehandlung im Ofen allein

weniger komplizirt war, so wurde diese fernerhin ausschliesslich angewandt.

Als Beispiel vom Gange der Experimente lasse ich hier die vollständige Beschreibung eines derselben folgen; von den anderen werde ich dann nur die Ergebnisse, in einer Tabelle zusammengefasst, geben.

Anfangsgewicht von 100 Weizenkörnern = 4.6626 Gr.

Nach einer viertägigen Keimung wurden dieselben im Trockenofen abgetötet und getrocknet. Das Trockengewicht war = 4.2884 Gr.

Der zur Verbrennung bestimmte Teil hatte ein Gewicht von 0.7310 Gr.

Die Temperatur des Wassers im Kalorimeter wurde jede halbe Minute abgelesen; auf der 5en Minute fand die Verbrennung statt.

	Temperatur des Wassers	Temperatur-Steigerung pro $^1/_2$ Min.
0 Min.	13.808°	
30 Sek.	13.809°	0.001
1 Min.	13.810°	0.001
30 Sek.	13.811°	0.001
2 Min.	13.812°	0.001
30 Sek.	13.813°	0.001
3 Min.	13.814°	0.001
30 Sek.	13.815°	0.001
4 Min.	13.816°	0.001
30 Sek.	13.817°	0.001
5 Min.	!!! (Verbrennung)	
15 Sek.	13.9°	
30 Sek.	14.2°	
45 Sek.	14.4°	

Durchschnittliche Steigerung pro $^1/_2$ Min. = 0,001°

	Temperatur des Wassers.	Temperatur-Steigerung pro $^1/_2$ Min.
6 Min.	14.56°	
15 Sek.	14.60°	
30 Sek.	14.62°	
45 Sek.	14.64°	
7 Min.	14.65°	
15 Sek.	14.66°	
30 Sek.	14.664°	
45 Sek.	14.668°	
8 Min.	14.669°	
15 Sek.	14.670°	
30 Sek.	14.670°	
45 Sek.	14.672°	
9 Min.	14.672°	
15 Sek.	14.673°	
30 Sek.	14.673°	
45 Sek.	14.673°	
10 Min.	14.673°	
30 Sek.	14.673°	
11 Min.	14.673°	
30 Sek.	14.673°	
12 Min.	14.672°	0.001
30 Sek.	14.671°	0.001
13 Min.	14.671°	0.000
30 Sek.	14.671°	0.000
14 Min.	14.670°	0.001
30 Sek.	14.669°	0.001
15 Min.	14.668°	0.001
30 Sek.	14.668°	0.000
16 Min.	14.667°	0.001
30 Sek.	14.667°	0.000
17 Min.	14.666°	0.001
30 Sek.	14.666°	0.000

Durchschnittliche Senkung pro $^1/_2$ Min. = 0.0005°

Die beobachtete Temperaturerhöhung nach der Verbrennung war 14.673 — 13.818 = 0.855°.

Anzubringende Korrektion = — (6 × 0.001) + (6 × 0.0005) = — 0.003°.

Berechnete Temperaturerhöhung = 0.855° — 0.003 = 0.852°.

Verbrennungswärme des Weizens . . = x Kal.
Verbrennungswärme des Eisendrahts (zur Entzündung) . . . . = 20.4 Kal.
Bildungswärme von 0.00036 mol. HNO_3*) = 5.4 Kal.

Totale Verbrennungswärme . . = 25.8 + xKal.

Gemessene Temperaturerhöhung des Kalorimeters = 0.852°.

Das Gewicht des die Bombe umspülenden Wassers war 2.7604 K.G.

Um dieses Wasser 0.852° in Temperatur zu steigern braucht man 0.852 × 2760.4 . . . . . . = 2351.9 Kal.

Zur Temperatursteigerung der Bombe 0.852 × 705.1 . . . . = 600.7 Kal.

Total . . = 2952.6 Kal.

2952.6 Kal. = 25.8 Kal. + x Kal.

x Kal. = 2926.8 Kal. d. i. die Verbrennungswärme von 0.7310 Gr. getrockneten Keimpflanzen.

Das Gewicht von 100 getrockneten Keimpflanzen war 4.2884 Gr.

Deren Verbrennungswärme wäre also gewesen: $\frac{4.2884}{0,7310} \times$ 2926.8 Kal.

*) Bei der Verbrennung entsteht ein wenig Salpetersäure, weil sich im Sauerstoffzylinder immer etwas Stickstoff befindet, der mit dem Sauerstoff in die Bombe eingeführt wird, und der sich bei der hohen Temperatur zum Teil oxydirt. Dieses Oxyd wird in etwas Wasser gelöst und die Menge der entstandenen Salpetersäure wird mittelst Titration bestimmt.

Diese 100 Weizenkörner hatten vor der Keimung ein Gewicht von 4.6626 Gr.

Die Verbrennungswärme von 4-Tage-alten Keimpflanzen, berechnet pro Gr. ungekeimter Weizenkörner war, nach dieser Beobachtung:

$$\frac{1}{4.6626} \times \frac{4.2884}{0.7310} \times 2926.8 = 3682 \ \textit{Kal.}$$

Was die andern Beobachtungen anbelangt, so glaube ich, dass es genügen wird, hier nur die erhaltenen Resultate, in folgender Tabelle zusammengefasst, anzugeben. Die Verbrennungswärme ist also immer pro Gr. ungekeimten Weizens berechnet.

Die Keimung fand statt bei ungefähr 20° C.	Verbrennungs-Wärme von Weizen pro Gr. Anfangsgewicht berechnet, in Gramm-Kalorien ausgedrückt.		
		Durchschnittswert.	Energie-Verlust.
Ungekeimt.	3748—3774—3778—3794—3797.[1]).	3778	am 1. Tage.
Nach 1. tägiger Keimung			„ 2. „
2. „ „	3756—3793.	3774	
3. „ „	3740.	3740	34 „ 3. „
4. „ „	3653—3681—3682—3707—3707.	3686	54 „ 4. „
5. „ „	3594.	3594	92 „ 5. „
6. „ „	3498.	3498	96 „ 6. „
7. „ „	3318.	3318	180 „ 7. „

Aus diesen Zahlen zeigt es sich, dass während der ersten zwei Tage sehr wenig Energie verloren ging. Auf einen bestimmten Energieverlust für dieses Stadium darf aus diesen Zahlen eigentlich nicht geschlossen werden, denn die Unterschiede der verschiedenen Parallelbestim-

[1]) Die Ergebnisse der Parallel-Bestimmungen sind nach zunehmender Grösse und nicht chronologisch geordnet.

mungen sind viel zu grosz im Verhältnisse zu dem geringen Verlust. Jedenfalls aber ist der Verlust während dieser ersten Tage sehr gering, wahrscheinlich spielt dann die Imbibition eine wichtige Rolle, besonders hier, weil die Samen vor der Keimung nicht erst in Wasser geweicht worden waren. Nachher fangen wahrscheinlich allmählig die Aufspaltungen an, während auch die Atmung kräftiger wird. Auch zeigt sich aus der Tabelle eine tägliche Zunahme des Energieverlusts wenigstens während der ersten 7 Keimungstage.

Wollte man diese Werte des Energieverlusts graphisch darstellen, so würde man eine Kurve finden, die, ungefähr horizontal anfangend, immer schroffer steigt.

Aus dem Energieverlust während der verschiedenen Tage, ist es möglich den Energieverlust pro Stunde pro K.G. Anfangsgewicht zu berechnen.

Nimmt man für den Energieverlust pro Gr. Anfangsgewicht nach zweitägiger Keimung 4 Kalorien an, so würde dieser Verlust während des 1. und 2. Tages pro Stunde pro K.G. Anfangsgewicht ungefähr sein $\frac{1000}{48} \times 4 = 83$ Kal.

Derselbe während des 3. Tages $\frac{1000}{24} \times 34 = 1417$ Kal.

„ „ „ 4. „ $\frac{1000}{24} \times 54 = 2250$ „

„ „ „ 5. „ $\frac{1000}{24} \times 92 = 3833$ „

„ „ „ 6. „ $\frac{1000}{24} \times 96 = 4000$ „

„ „ „ 7. „ $\frac{1000}{24} \times 180 = 7500$ „

Diese Menge verlorener chemischer Energie entspricht also wahrscheinlich derjenigen, die zu osmotischen Zwecken, zur Ueberwindung von Widerständen und zur Abgabe von Wärme angewandt wird.

Wärme-Entwickelung während der Keimung.

In den folgenden Experimenten habe ich versucht, die, während der Keimung von Weizenkörnern stattfindende Wärme-Entwickelung direkt zu messen.

Der Grundgedanke, worauf diese Bestimmungen begründet waren, war kurz die folgende: mit Wasserdampf gesättigte Luft, von bekannter konstanter Temperatur, wurde mit konstanter Schnelligkeit über keimende Weizenkörner geführt; diese verhielten sich wie eine fortwährende Wärmequelle; die passirende Luft musste also unbedingt in Temperatur steigen.

Mässe man nun den Temperatur-Unterschied der ein- und ausströmenden Luft, und fände weiter gar kein Wärmeaustausch statt, so würde man in diesem theoretisch vorausgesetzten Fälle aus der bekannten Wärme-Kapazität der Luft und der bekannten Durchströmungsschnelligkeit die Menge freigekommener Wärme berechnen können. Ueberdies müszte dabei der Raum, wo sich die Keimpflanzen befänden, mit Wasserdampf gesättigt sein; wäre dies nicht der Fall, so würde während der Keimung Verdampfung stattfinden, und so würde also ein Teil der Wärmemenge der Beobachtung entzogen werden. Obgleich nun dieser Grundgedanke beim Gang der Experimente nicht aus dem Auge verloren ist, so zeigten sich doch allmählig manche Schwierigkeiten in der Ausführung, welche ich nicht im Stande gewesen bin, alle zu beseitigen.

Im Anfang habe ich zur Ausführung dieser Bestimmungen eine Vorrichtung benutzt, die sich aber als ganz

unbrauchbar gezeigt hat; für den Fall jedoch, dass diese Untersuchungen vielleicht noch von andern fortgesetzt werden, will ich die Beschreibung dieser Vorrichtung folgen lassen.

Die Keimpflanzen wurden in ein geräumiges Dewar'sches Gefäss gebracht; dieses Gefäss wurde mit einem dicken hölzernen Deckel geschlossen. Die Wärmequelle befand sich also in einer Umgebung, wo der Wärmeaustausch nur sehr gering war. Dieses Gefäss wurde in einem grossen Wasserbade, mittelst eines sehr empfindlichen Thermoregulators mit grossem Toluolgefässe auf konstanter Temperatur gehalten. Das Dewar'sche Gefäss umgebend befand sich in verschiedenen Windungen ein langes bleiernes Rohr, welches mittelst eines Kautschuk-Schlauches mit einem andern verbunden war; dieses trat durch den Deckel in das Gefäss und streckte sich über dessen ganze Länge aus, um ganz am Boden zu münden. Durch dieses Rohr hindurch hatte die Luft freien Eintritt ins Innere.

Eine zweite Oeffnung im Deckel, mit einem Kautschuk-Schlauche verbunden, gestattete den Austritt der Luft; ein Aspirator unterhielt während der Bestimmungen einen fortwährenden Luftstrom, dessen Schnelligkeit genau regulirt werden konnte.

Die Temperatur der Luft wurde von zwei geaichten Beckmann'schen Thermometern gemessen. Das erste war auf dem Wege aufgestellt, den die Luft nahm und eben da, wo sie im Begriff war, ins Gefäss hinein zu treten. Hier hatte die Luft also die konstante Temperatur des Wassers angenommen. Das zweite Thermometer befand sich im Deckel, an derjenigen Stelle, wo die Luft das Gefäss gerade verlassen wollte.

Der Zweck dieser Vorrichtung ist klar. Nur wenig der von den kiemenden Weizenkörnern abgegebenen Wärme würde im Dewar'schen Gefässe mittelst Ableitung verloren gehen; der grösste Teil würde angewandt werden

um die passirende Luft zu erwärmen; der Temperatur-Unterschied der Luft, vor- und nachdem diese über die keimenden Körner gestrichen war, was mit einer Schnelligkeit von 3 L pro Stunde geschah, wurde von den beiden Thermometern angegeben.

Wie einfach die Ausführung dieser Experimente in der Theorie auch sonst scheinen mag, so unmöglich zeigte es sich in der Praxis, um auf diese Weise zu irgendeinem Resultat zu gelangen. Die Schwierigkeiten zeigten sich schon sofort bei der allereinfachsten Aufstellung. Befände sich nämlich gar keine Wärmequelle im Inneren, so müsste natürlich die Temperatur der ein- und ausströmenden Luft nach einiger Zeit dieselbe sein. Zwar würde dieser Ausgleich immer einige Zeit dauern, denn das Gefäss hatte bei der Aufstellung nie gerade dieselbe Temperatur wie das Wasser, dessen Temperatur konstant war.

Bei der Beobachtung zeigte es sich aber, dass es sehr lange, sicher wohl 12 Stunden dauerte, bevor dieser Zustand erreicht war. Die Ursache war wahrscheinlich hauptsächlich die folgende: der Temperaturunterschied zwischen dem Gefässe und dem umgebenden Wasser sollte durch Austausch mittelst der durchströmenden Luft verschwinden. Erstens war nun die Wärmekapazität der Luft äusserst gering im Vergleich zu derjenigen des Dewar'schen Gefässes, und zweitens vermittelte eine Durchströmungsschnelligkeit von nur 3 L pro Stunde diesen Austausch schon sehr wenig.

Dieselbe Ursache würde zur Folge haben, dass es wahrscheinlich auch sehr lange dauern würde, bevor kleine Steigerungen der Temperatur von der Keimung der Weizenkörner im Gefässe verursacht, vom Thermometer gezeigt wurden.

Während man das Gefäss auf die rechte Temperatur brachte, hätte man immer noch die Strömungsschnelligkeit der Luft vergrössern können, damit der Austausch be-

schleunigt wurde. Während der eigentlichen Wahrnehmung aber würde man die Luft doch gewiss nicht schneller als 3 L pro Stunde durchströmen lassen, weil sonst die von dieser geringen Wärmequelle verursachte Temperaturerhöhung zu klein sein würde, um beobachtet werden zu können.

Wie ich mich auch darum bemüht habe die Aufstellung mit Hülfe allerart Änderungen zu dem erwünschten Zweck brauchbahr zu machen, so ist es mir nicht gelungen zu einem günstigen Resultat zu kommen, und ich glaube denn auch mit Sicherheit behaupten zu können, dass es auf diese Weise unmöglich ist.

Um den Zweck zu erreichen musste also eine andere Vorrichtung gefunden werden. Weil sich als die grösste Schwierigkeit die viel zu grosse Wärmekapazität des Gefässes gezeigt hatte, musste jetzt besonders eine so gering wie mögliche Wärmekapazität angestrebt werden.

Nachdem ich die obigen Schwierigkeiten Herrn Professor Julius vorgelegt hatte, hat dieser die Güte gehabt, sich um eine andere Vorrichtung zu bemühen, um die genannten Beschwerden zu umgehen und hat einen Entwurf zu einer Vorrichtung gemacht, die eine Messung dieser geringen Wärmeentwickelung mittelst Temperaturerhöhung ermöglichen sollte. Der Entwurf wurde vom Mechaniker des Botanischen Instituts Herrn L. Roelink sehr genau ausgeführt.

Diese Vorrichtung zeigte sich als eine grosse Verbesserung; die gewünschten Bestimmungen wurden jetzt wirklich ausführbar, obgleich sich auch hier Komplikationen einstellten, welche ungewünschte Einflüsse auf die Beobachtungen ausübten.

Das Dewar'sche Gefäss der früheren Vorrichtung wurde gegen ein kupfernes Gefäss vertauscht, dessen Wärmekapazität wohl sehr viel geringer war, wodurch aber die vollkommene Isolirung verloren ging.

Bei der jetzt folgenden Beschreibung dieser neuen Vor-

richtung verweise ich auf die beiden Zeichnungen am Schluss. Zeichnung I zeigt das Gefäss im Wasserbade im Durchschnitt; die verschiedenen Teile sind nicht perspektivisch gezeichnet, sodass Zirkel nicht als Ellipsen sondern als Zirkel dargestellt sind. Nur das Wasserbad ist in vertikaler Projektion gezeichnet.

Im kupfernen zylindrischen Gefässe (A) befindet sich ein zweiter abgeschlossener zylindrischer Raum, dessen Seitenwand aus Mika (B) und dessen Boden aus Kupfer (C) besteht; beide sind perforirt, in dem Mika ist die Anzahl der Öffnungen aber geringer als im Boden.

Die Mikawand ist oben in einen kupfernen Ring gefasst, auf welchem zum Abschluss ein gläserner Trichter (D) ruht, dessen Abfuhrrohr bis auf einige Centimeter abgeschnitten ist. Der Trichter ist zur besseren Isolirung oben mit einer dicken Filzschicht (E) gedeckt.

Im Innern des zweiten zylindrischen Raumes befindet sich ein Stativ, auf welchem fünf über einander geschichtete Ebonitscheiben (F) befestigt sind; auf diese wurden die für die Beobachtungen bestimmten Keimpflanzen gelegt. In den Scheiben sind auch wieder Öffnungen in regelmässigen Entfernungen angebracht worden, damit eine vollständige Zirkulation der Luft stattfinden kann.

Beim Entwurf der ganzen Vorrichtung ist also genau darauf geachtet, für den Aufbau Material von geringer Wärmekapazität zu wählen.

Geben wir uns jetzt einmal genau Rechenschaft über den Weg, welchen die Luft zu nehmen hatte. Bevor sie in das Wasserbad eintrat, hatte sie zwei Waschflaschen und ein U-Rohr zu passiren. In der ersten Flasche befand sich konzentrirte Kalilauge und im U-Rohr ausgeglühter Bimsstein, ebenfalls von Kalilauge durchzogen; hier wurde die Luft also von Kohlensäure befreit (dies hat aber nur Zweck, wenn bei der Beobachtung auch zu gleicher Zeit das Volumen ausgeatmeter Kohlensäure bestimmt wird).

In der zweiten Waschflasche befand sich konzentrirte Schwefelsäure um die möglichen Verunreinigungen der Luft, wie NH_3 u. s. w. zu absorbiren.

Von dieser letzten Flasche führte ein Kautschukschlauch ins Wasserbad hinein; dieser Schlauch kommunizirte mit einem kupfernen Rohre, dessen unteres Ende von zahlreichen kleinen Öffnungen durchlöchert war. Dieses Ende befand sich in einem geräumigen Glasrohre (R), das mit Wasser bis grade über die Öffnungen angefüllt war. Die Luft hatte also, bevor sie ihren Weg weiter verfolgen konnte, immer eine kleinere oder grössere Wasserschicht zu durchziehen; hier wurde sie also mit Wasserdampf bei der Temperatur des Wasserbades gesättigt. Dann verfolgte die Luft ihren Weg durch das Bleirohr (G), welches sich in verschiedenen Windungen um das kupferne Gefäss herum befand. Dieses Rohr führte schliesslich in ein T-stück; von hierab teilte sich also der Weg, den die Luft zu nehmen hatte; die beiden Öffnungen H und J gestatteten den Eintritt ins Gefäss. Durch die Öffnungen im kupfernen Boden, oder in der Mikawand, konnte die Luft in den zweiten Raum hineinströmen, wo sich die Keimpflanzen befanden.

Oben in der Öffnung des Trichters war ein Glasrohr eingeschliffen, welches mittelst eines Kautschukschlauches mit dem Aspirator verbunden war.

Als Aspirator diente ein mit Wasser gefüllter Gasbehälter (22 L); unten konnte das Wasser mit einer mittelst eines Zapfens regulirbaren Schnelligkeit abfliessen. Auf diese Weise war also auch die Durchströmungsschnelligkeit der Luft zu reguliren; diese wurde für die Beobachtungen auf 3 L pro Stunde gestellt.

Der Aspirator wurde jede Stunde angefüllt; die Niveau-Änderung war also sehr gering und man konnte ruhig annehmen, dass während dieser Zeit die Strömungsschnelligkeit fast konstant war. Auf diese Weise wurde also ein regelmässiger Luftstrom durch das Gefäss unterhalten.

Die Luft, in das Gefäss mit Keimpflanzen eintretend, musste also eine konstante Temperatur haben; diese hatte sie auf dem langen Wege durch das gewundene, ganz vom Wasser umspülte Bleirohr annehmen können. Um dies zu erreichen war es nötig die Temperatur des Wassers so viel wie möglich konstant zu erhalten, was mittelst eines Thermoregulators mit grossem Toluolgefässe geschah.

Zwei Rührer (S) besorgten, dass die Temperatur im Wasserbade überall gleich war; diese Rührer streckten sich von oben bis unten im Wasser aus, und waren der ganzen Länge nach mit zwei Reihen gebogener Schuppen besetzt. Sie wurden vermittelst eines Elektromotors in Bewegung gesetzt.

Der Temperaturunterschied der ein- und ausströmenden Luft wurde mit Thermonadeln (Kupfer-Konstantan) gemessen. Die erste Nadel (L) befand sich auf dem Wege der einströmenden Luft, wo diese also die konstante Temperatur des Wassers hatte; die zweite (K) war oben in der Öffnung des Trichters angebracht, also da, wo die Luft gerade im Begriff war das Gefäss zu verlassen, nachdem sie über die keimenden Weizenkörner hingestrichen war. Um diese Nadel herum war in der Öffnung des Trichters eine dicke Schicht feiner Kupfergaze (P) befestigt; die gewärmte, entlang-streichende Luft kam hier direkt mit einer grossen und gut-leitenden Oberfläche in Kontakt, die leichter die Temperatur derselben annahm und auf die Thermonadel übertrug, als wenn diese letztere selbst von der passirenden Luft auf diese Temperatur hätte gebracht werden müssen.

Der schwache elektrische Strom, der durch diesen Temperaturunterschied der Nadel entstand, wurde durch ein äusserst empfindliches Spiegelgalvanometer von Siemens und Halske geleitet. Ein Lichtbildchen wurde mittelst eines Nernstlämpchens via den Spiegel auf die verteilte Skala geworfen. Je kräftiger also der elektrische Strom war,

der durch das Galvanometer ging, desto grösser war der Ausschlag des Spiegels und folglich des Bildchens auf der Skala.

Zuerst musste nun bestimmt werden, wie gross dieser Ausschlag für einen bestimmten Temperaturunterschied war.

Dazu wurde die Thermonadel L in ein Wasserbad von konstanter Temperatur gestellt, während die andere Nadel K sich in einem Dewar'schen Gefässe befand, welches mit Wasser von einer etwas höheren Temperatur als die der Umgebung angefüllt war. Ein Wattepfropf schloss die Öffnung des Gefässes ab, und vermittelte eine bessere Isolirung.

Das Wasser im Gefässe kühlte also sehr langsam ab, und dadurch wurde der Temperaturunterschied mit dem Wasser, worin sich L befand, allmählig grösser. Zwei zuvor geaichte Beckmann'sche Thermometer dienten dazu, diesen Temperaturunterschied zu messen und ermöglichten den Unterschied bis auf $^1/_{1000}{}^\circ$ genau abzulesen. Jedes Thermometer befand sich in unmittelbarer Nähe einer Thermonadel. Es wurde festgestellt, wie gross der Ausschlag des Spiegelbildchens bei einem bestimmten Temperaturunterschiede war, und hiernach wurde der Ausschlag für den Unterschied von einem Grade berechnet.

Wenn man diese Bestimmungen für verschiedene Temperaturintervalle häufig wiederholt, so hat man, was diese Ausschlagseinheit anbelangt, genügende Sicherheit.

Schliesslich soll noch bemerkt werden, dass überall wo von einem Ausschlag des Lichtbildchens die Rede ist, immer der doppelte Ausschlag gemeint ist, denn bei den Ablesungen wurde stets die Richtung des Stromes mittelst eines Kommutators umgekehrt, und die Entfernung der beiden aüssersten Stellungen des Lichtbildchens aufgenommen.

Es zeigte sich, dass ein Temperaturunterschied von 1° mit einem (doppelten) Ausschlag von 24.8 cM. auf der Skala übereinstimmte. Für 0.01° war dieser also 2,5 mM.,

sodass ein Temperaturunterschied von 0.005° auf diese Weise noch zu messen war.

Weiter wurde auch bestimmt, wie gross der Ausschlag war, wenn ein Strom von bekannter Kraft durch den Galvanometer gesandt wurde. War diese Stromstärke 10^{-6} Ampère, so zeigte das Bildchen einen Ausschlag von 35.8 cM. während die Entfernung des Galvanometers von der Skala 208 cM. war.

Ein Temperaturunterschied von einem Grade verursachte also einen Strom von $\frac{24.8}{35.8} \times 10^{-6}$ Ampère, was wohl gelten kann als ein Beweis für die grosse Empfindlichkeit dieser Vorrichtung.

Die Thermonadeln wurden also in der oben beschriebenen Weise im Gefässe angebracht, um den Temperaturunterschied zu messen, der von einer sich im Innern befindenden Wärmequelle verursacht worden war.

Man hat sich nun zuerst die Frage zu stellen, welcher Zusammenhang diese Wärmequelle und die von ihr verursachte Temperatursteigerung theoretisch hat.

Erstens gestattet die geringe Wärmekapazität der Bestandteile der ganzen Vorrichtung (Ebonit, Kupfer, Mika) einen schnellen Austausch von Wärme mit der Umgebung, und das Gefäss gelangt bald in einen stationären Zustand. Teils wird die frei gewordene Wärme die Temperatur der passirenden Luft steigern; teils wird sie aber auch an das umgebende Wasser abgegeben werden. Diese beiden Mengen Wärme zu berechnen würde sehr komplizirt, wenn nicht gar ganz unmöglich sein.

Es lag also auf der Hand durch Aichung zu bestimmen, wie gross der Ausschlag des Lichtbildchens sei, wenn eine Wärmequelle von bekannter Grösse sich im Gefässe befand.

Zur Bestimmung wurde ein langer, dünner Manganin-Draht, dessen Widerstand bekannt war, über eine mög-

lichst grosse Ausdehnung im Innern des Gefässes gewunden. (Dieser Draht ist in der Zeichnung als eine weisse Linie auf dem schwarzen Grunde der Ebonitscheiben angegeben).

Mittelst eines gröberen, angelöteten Kupferdrahtes wurde metallischer Kontakt mit den beiden kupfernen Stäben M. und N., die sich an der Aussenseite der Mikawand ausdehnten, gemacht. Der Kupferstab M. war ganz isolirt aufgestellt.

Beide Stäbe traten durch einen Kautschuk-Pfropf durch den Deckel hindurch, und ragten über das Wasser des Kalorimeters hinaus.

Wurden die beiden Enden mit den beiden Polen eines Akkumulators verbunden, so durchströmte den Manganin-Draht ein elektrischer Strom. Die Stärke desselben wurde mit einem Milliampèremeter gemessen.

Erhielt man abwechselend den Strom von 1, 2 und 3 Akkumulatoren so konnte man beliebig drei verschiedene Wärmequellen in das Gefäss einführen.

Die Wärme-Entwickelung im Stromleiter ist 0.24 i^2r pro Sek. also 3600 × soviel pro Stunde.

i wurde vom Milliampèremeter angegeben.

r ist der Widerstand des Manganin-Drahts welcher sich bei der Bestimmung als 59.2 Ohm ergab.

Ausser mit den drei Stromstärken, bezogen von 1, 2 und 3 Akkumulatoren, wurde auch geaicht mit einer vierten Stromstärke, von 3 Akkumulatoren geliefert, mit Anwendung eines extra Widerstandes im äusseren Kreise.

In der folgenden Tabelle sind die Werte dieser vier Stromstärken und die von diesen im Manganin-Drahte verursachten Wärme-Entwickelung zusammengefasst. $r =$ 59.2 Ohm.

In A, B und D verhält die Stromstärke sich wie 1 : 2 : 3, also die von ihr verursachte Wärme-Entwickelung wie 1 : 4 : 9.

Stromstärke.	Wärme-Entwickelung im Manganin-Drahte pro Stunde.
A = 0.032 Ampère	$0.24 \times 0.032^2 \times 59{,}2 \times 3600 =$ 52.38 Kal.
B = 0.064 „	$0.24 \times 0.064^2 \times 59.2 \times 3600 =$ 209.50 „
C = 0.084 „	$0.24 \times 0.084^2 \times 59.2 \times 3600 =$ 360.90 „
D = 0.096 „	$0{,}24 \times 0.096^2 \times 59.2 \times 3600 =$ 471.38 „

Bei der Aichung dienten vier Streifen durchtränkten Filtrirpapiers dazu um im Innern des Gefässes eine Sättigung mit Wasserdampf zu erzeugen, damit die Bedingungen soviel wie möglich mit denen vergleichbar wurden, unter welchen die definitiven Bestimmungen stattfanden. Darauf wurde das Gefäss in das Wasserbad gestellt, dessen Temperatur mittelst Regulators und Mikrobrenners konstant gehalten wurde.

Die Luft wurde mit einer Schnelligkeit von 3 L. pro Stunde durchgeführt und die kupfernen Stäbe M. und N. mit den beiden Polen des Akkumulators verbunden. Ursprünglich war die Temperatur im Gefässe niedriger als die des umgebenden Wassers; die durchströmende, konstant-temperirte Luft und die im Manganin-Drahte entwickelte Wärme würden diesen Temperatur-Unterschied vermindern, bis dieser endlich null wäre, dann aber würde die ausströmende Luft anfangen eine höhere Temperatur als die einströmende zu zeigen, als Folge der Wärmequelle im Gefässe. Dieser Unterschied würde sich so lange steigern, bis ein Maximum erreicht wäre. Grösser würde, bei der gegebenen Durchströmungsschnelligkeit der Luft, der von dieser bestimmten Wärmequelle verursachte Unterschied nicht werden.

Es nahm ziemlich viel Zeit in Anspruch (3 bis 4 Stunden) bevor dieser Maximum-Ausschlag erreicht war; dazu muss bemerkt werden, dass kleine Temperatur-Unterschiede des umgebenden Wassers (diese betrugen normal nicht

mehr als 0.02°) die, an allen Seiten vom Wasser umgebene, Nadel L. stärker beeinflussten als K, die sich im Innern des Gefässes befand. Diese Thatsache und andere kleine Unregelmässigkeiten, die anscheinend die Beobachtung gewissermassen beeinflussten, hatten zur Folge, dass der Ausschlag nicht eine vollkommene Proportionalität mit der Grösse der Wärmequelle zeigte, jedenfalls aber eine gewisse Annäherung.

Aus den gefundenen Werten glaube ich schliessen zu dürfen, dass ein deutlich zu beobachtender Zusammenhang zwischen der Wärme-Entwickelung im Gefässe und dem Ausschlage des Lichtbildchens bestand.

Temperatur des umgebenden Wassers	Ausschlag des Lichtbildchens auf der Skala			
	Wenn 52 Kal. —	209 Kal. —	361 Kal. —	471 Kal. pro Stunde frei werden
20°	3.65 cM.	17.21 cM.		40.38 cM.
30°	4.40 „	16.56 „		40.88 „
	4.22 „			
40°			31.22 cM.	

Bei 20° und 30° verhielten die Wärmequellen sich also wie 1 : 4 : 9 und diese Beziehung bestand, wie man aus obenstehender Tabelle ersieht, auch zwischen den von dieser Wärmequelle verursachten Ausschlägen des Lichtbildchens. Wenn man bedenkt, dass die unumgänglichen Fehler die grössten Ausschläge verhältnissmässig am wenigsten beeinflüssen, so wird man als Ausgangspunkt am besten den Ausschlag 40.88 cM. für 471 Kal. annehmen. Dieser Wert für 52 — 209 und 361 Kal. umgerechnet gibt als korrespondirende Ausschläge $^1/_9 \times 40.88 = 4.54$, $^4/_9 \times 40.88 = 18.18$, und $\frac{361}{471} \times 40.88 = 31.33$.

Bei einer Vergleichung dieser berechneten Werte mit den in der Tabelle angegebenen bemerkt man eine gewisse Übereinstimmung, obgleich die Abweichungen bei den zwei geringeren Wärmequellen verhältnissmässig sehr gross sind. Hier muss, im Hinblick auf später erhaltene Resultate, insbesondere darauf hingewiesen werden, dass wenn sich keine Wärmequelle im Gefässe befand, der Ausschlag stets null war, oder jedenfalls nicht mehr als 0.2 cM. davon abwich.

Diese Aichungen liessen also darauf schliessen: 1. dass der Maximum-Ausschlag des Lichtbildchens, oder mit andern Worten der Temperaturunterschied der ein- und ausströmenden Luft, ungefähr proportionell mit der sich im Gefässe befindenden Wärmequelle war, 2. dass diese Proportionalität wenigstens für die Temperaturen 20°—30°—40° galt, 3. dass die absolute Grösse des Ausschlages in keiner Beziehung zu dieser Temperatur stand, 4. dass ein Ausschlag des Lichtbildchens von 1 cM. $\frac{471}{40.88}$ = ungefähr *11.5 Kal. pro Stunde* frei gewordener Wärme angab.

Nach dieser Aichung konnte man also umgekehrt durch Ablesung des Ausschlags die Grösse der Wärmequellen im Gefässe berechnen. Als eine solche unbekannte Wärmequelle wurden die keimenden Weizenkörner aufgefasst.

Die Bestimmungen wurden stets mit 500 Keimpflanzen ausgeführt, deren Anfangsgewicht immer vor der Keimung bestimmt war, wie das ja auch bei den Bestimmungen der Verbrennungswärme der Fall gewesen war.

Die Auskünfte wurden wiederum durch 2 ungünstige Umstände beeinflusst. Erstens durch die schon besprochenen Temperaturschwankungen während der Keimung und zweitens durch die Unregelmässigkeit der Keimung selbst. Es wurden immer gesunde Weizenkörner von ungefähr gleicher Grösse für die Bestimmungen gewählt; von diesen

blieben aber immer einige durch individuelle Ursachen in Wachstum zurück, während einzelne auch gar nicht keimten. Im Allgemeinen fand jedoch die Keimung sehr regelmässig statt und die Anzahl der im Wachstum zurückgebliebenen Körner war verhältnissmässig sehr gering. Weil aber das Anfangsgewicht unbedingt für die Berechnungen bekannt sein musste, und dies natürlich nicht mehr der Fall gewesen wäre wenn einige Keimpflanzen entfernt und aus einer andern Kultur ersetzt worden wären, so war ich wohl gezwungen alle 500 Pflanzen, ob gut gekeimt oder nicht, zu benutzen.

Diese beiden Fehlerquellen vergrösserten also noch die Anzahl derer, welche diese Methode zur Bestimmung der Wärme-Entwickelung ohnehin schon mit sich brachte.

Es muss jetzt noch auf eine eigentümliche Komplikation, die sich beim Gange der Beobachtungen zeigte, hingewiesen werden. Es zeigte sich nämlich im Laufe der Untersuchung, das der Ausschlag des Lichtbildchens bei Gegenwart lebender Keimpflanzen im Gefässe nicht ausschliesslich als Mass für die Wärme-Entwickelung bei der Keimung anzusehen war.

Dies wurde dann klar, als zur Kontrole gekeimte Körner, die aber zuvor im Trockenofen bei 100° C abgetötet waren, ins Gefäss gebracht wurden. Die Keimung und die damit verbundene Wärme-Entwickelung fanden in diesem Falle nicht statt. Weil sich also jetzt keine Wärmequelle im Gefässe befand, würde man erwartet haben, dass die Nadel nach einiger Zeit dieselbe Temperatur annehmen und das Lichtbildchen sich auf Null stellen wurde.

Dieses war aber nie der Fall. Immer wurde die Nullstellung vom Lichtbildchen überschritten und zwar so, dass der Ausschlag immer eine höhere Temperatur für die obere Nadel angab.

Die Luft war also offenbar auf ihrem Wege durch das Gefäss hindurch auf die eine oder andere Weise dennoch

in Temperatur gestiegen. Wo sich in diesem Falle die Wärmequelle befand, war nicht klar; die, für die Beobachtung bestimmten abgetöteten Keimpflanzen waren immer ganz imbibirt und der Zimmertemperatur gleich ehe sie in das Gefäss eingeführt wurden.

Bei diesen mehrfach wiederholten Beobachtungen zeigte sich auf der geteilten Skala immer ein Ausschlag des Lichtbildchens, der eine Durchschnitts-Grösse von ungefähr 8 cM. hatte, aber noch ziemlich grosse Schwankungen zeigen konnte.

Wurde diese Beobachtung bei einer Temperatur des umgebenden Wassers und ebenfalls der einströmenden Luft von 25° C oder 35° C ausgeführt, so hatte diese Temperatur keinen merkbaren Einfluss auf die Grösse des Ausschlags; der in diesen beiden Fällen entstandene Temperaturunterschied war gleich gross, mit andern Worten, der Ausschlag war in beiden Fällen ungefähr 8 cM.

Nicht ausgeschlossen war aber, dass die getöteten Keimpflanzen trotzdem doch vielleicht noch einige Wärme als Folge einer fortschreitenden Enzymwirkung entwickelten. Zur Kontrole wurde deswegen das Gefäss jetzt mit einer Masse imbibirten Filtrirpapiers angefüllt. Eine direkte Wärme-Entwickelung vom Filtrirpapier war hier ausgeschlossen. Wurde jetzt aber die Luft durchgeführt und mit den Ablesungen so lange gewartet bis das Innere des Gefässes dieselbe Temperatur als die des umgebenden Wassers angenommen hatte, so wurde nachher ausnahmslos die Nullstellung überschritten und ein Maximum-Ausschlag erreicht, der mit demjenigen übereinstimmte, der bei Anwesenheit abgetöteter Pflanzen im Gefässe auftrat.

Hier konnte von einer direkten Wärme-Entwickelung durch die angewandten Stoffe nicht die Rede sein und es galt also, eine andere Ursache der Temperatursteigerung zu suchen. Wie schon gesagt ist, war von diesen Unregelmässigkeiten bei den Aichungen nichts zu

bemerken gewesen; ohne Wärmequelle im Innern war hier auch wirklich die Nullstellung konstatirt worden. Der Unterschied der Bedingungen damals und jetzt bestand wohl hauptsächlich darin, dass während der Beobachtungen mit abgetöteten Pflanzen oder nassem Filtrirpapier der Raum im Innern grösstenteils mit einer vollkommen imbibirten Masse angefüllt war.

Als die wahrscheinliche Ursache dieser Temperatursteigerung der ausströmenden Luft glaube ich eine Kondensation von Wasserdampf ansehen zu müssen, welche in der einen oder andern Weise notwendig war; die bei der Kondensation freigewordene Wärme hätte eine Temperatursteigerung verursachen können.

Wie ich auch versucht habe diese Fehlerquelle zu eliminiren, es ist mir leider nicht gelungen. Wohl zeigte sich bei den verschiedenen Versuchen die Kupfergaze, welche im Trichter die oberste Nadel umgab, von grossem Einfluss auf diese Unregelmässigkeit; denn wurde die Gaze fortgelassen, so währte es viel länger ehe die Nadel die Temperatur angenommen hatte und ein Maximum-Ausschlag erreicht war. Zugleich war aber dieser Maximum-Ausschlag bedeutend geringer (in diesem Falle nicht mehr als ungefähr 3 cM.). Die Kupfergaze war sehr dicht auf einander geschichtet worden, die Poren waren also sehr eng, sodass vielleicht hier eine günstige Bedingung zur Kondensation des Wasserdampfes geboten war.

Auch bei ähnlichen Versuchen mit einer viel einfacheren Aufstellung (das kupferne Gefäss wurde gegen ein einfaches Glasrohr vertauscht) zeigte sich ein gewisser, wenn auch jetzt viel geringerer Temperaturunterschied, sobald Luft über die imbibirten Stoffe geführt wurde.

Ob vielleicht eine physikalische Ursache festgestellt werden kann, die erklärt, dass ein Temperaturunterschied unbedingt entstehen muss, wenn Luft durch einen von Wasserdampf gesättigten Raum geführt wird, ist eine

offene Frage, auf die ich keine Antwort gefunden habe. Deshalb war es auch unmöglich diese unerklärte Fehlerquelle zu eliminiren. Mir blieb also nichts übrig, als diese ausschliesslich physikalische Frage ruhen zu lassen, und eine Korrektion in den Berechnungen an zu bringen, welche sich experimentell als nötig erwiesen hatte, theoretisch aber unaufgeklärt bleiben musste.

Da es sich also gezeigt hatte, dass die Anwesenheit feuchter Substanzen im Gefässe einen Temperaturunterschied verursachte, so musste wohl angenommen werden, dass dieses bei Anwesenheit feuchter, lebender Keimpflanzen auch der Fall sei. Der Ausschlag, der sich in diesem Falle zeigte, war also zum Teil obiger Ursache zuzuschreiben, zum Teil aber der Wärme-Entwickelung, welche tatsächlich bei der Keimung stattfand.

Hat man also die Grösse des Ausschlags bei Anwesenheit abgetöteter Keimpflanzen im Gefässe festgestellt, so hat man diese von demjenigen abzuziehen, welcher wenn sich lebende Pflanzen im Innern befinden, gefunden wurde. Der Rest des Ausschlags kann als Mass der Menge bei der Keimung entwickelter Wärme aufgefasst werden.

Als anzubringende Korrektion wurde der Durchschnitt einer Anzahl Ausschläge genommen, die bei verschiedenen Beobachtungen gefunden worden waren, bei denen sich abgetötete ganz imbibirte Keimpflanzen im Gefässe befanden. Die Grösse dieses Ausschlags wechselte aber verhältnissmässig stark, woran ich nichts ändern konnte, weil die Ursache unbekannt geblieben. Wäre dieser Ausschlag konstant gewesen, so wäre das für die Berechnung der Keimungswärme gewiss auch viel günstiger gewesen. Die verhältnissmässig grossen Schwankungen dieser obengenannten Ausschläge übten einen starken Einfluss auf den die Keimungswärme angebenden Ausschlag aus. Diese Zahlen zeigen somit auch verhältnissmässig grosse Unregelmässigkeiten.

Bei Anwesenheit 500 abgetöteter Keimpflanzen (4 bis 5 Tage alt) wurden als Maximum-Ausschläge abgelesen 9.08, — 6.92, — 10.44, — 6.55, — 9.90.

Der Durchschnitt dieser fünf Zahlen, *8.58*, war also die anzubringende Korrektion.

Fragt man sich, wie gross diese unbekannte Wärmequelle war, so findet man $8.58 \times 11.5 = 99$ Kal. pro Stunde.

Die von dieser Wärme verursachte Temperatursteigerung war $\frac{8.58}{24.8} = 0.35°$. (Ein Temperaturunterschied von 1° wurde auf der Skala mit 24.8 cM. angegeben).

Ich lasse hier die vollständige Beschreibung einiger Beobachtungen folgen, um zu zeigen wie die Berechnung ausgeführt wurde.

1. Das Anfangsgewicht der 500 für die Beobachtung bestimmten Weizenkörner war 22.7343 Gr.

Nach dreitägiger Keimung wurden dieselben ins Gefäss gebracht, während die konstante Temperatur des umgebenden Wassers 29.88° C. war.

Pro Stunde wurde 3 L. Luft durchgeführt.

Um 2 Uhr 35 Min. wurde mit der Ablesung der Ausschläge angefangen.

Zeit der Beobachtung.	Grösse des doppelten Ausschlags.
2 Uhr 35 Min.	20.24 cM.
2.45	20.28 „
2.50	20.40 „
2.55	20.50 „
3.05	20.76 „
3.15	21.00 „
3.20	21.06 „
3.25	21.06 „
3.30	21.03 „

Maximum-Ausschlag 21.06 cM.

Der Wärme-Entwickelung während der Keimung ist hiervon zuzuschreiben 21.06 — 8.58 = 12.48 cM.

Dies gibt 12.48 × 11.5 = 143.52 Kal. pro Stunde frei werdend.

Das Anfangsgewicht dieser Körner war 21.7343 Gr.

Die Anzahl Kalorien bei 30° am 4en Keimungstage pro Stunde frei werdend pro KG. Anfangsgewicht berechnet, die diese Beobachtung ergab, war:

$$\frac{1000}{22.7343} \times 143.52 = \mathit{6313\ Kal.}$$

2. Das Anfangsgewicht von 500 Körnern war 21.7247 Gr.

Nach fünftägiger Keimung wurden dieselben zur Beobachtung benutzt. Die konstante Temperatur des Wassers war 25.12°, die Strömungsschnelligkeit der Luft 3 L. pro Stunde.

Mit den Ablesungen wurde um 1 Uhr 35 Min. angefangen.

Zeit der Beobachtung.	Grösse des doppelten Ausschlags.
1 Uhr 35 Min.	5.48 cM.
1.45	7.60 „
1.55	8.96 „
2.05	10.10 „
2.35	12.98 „
2.45	13.72 „
2.55	14.04 „
3.05	14.84 „
3.15	15.25 „
3.25	15.68 „

Zeit der Beobachtung.	Grösse des doppelten Ausschlags.
3 Uhr 35 Min.	16.07 cM.
3.45	16.22 „
3.55	16.54 „
4.00	16.65 „
4.10	16.63 „
4.15	16.78 „
4.20	16.68 „

Maximum-Ausschlag 16.78 cM.

Hiervon war der Keimungswärme zuzuschreiben 16.78 — 8.58 = 8.20 cM.

Dies gibt 8.20 × 11.5 = 94.30 Kal. pro Stunde frei werdend für ein Anfangsgewicht von 21.7247 Gr.

Die Anzahl Kalorien bei 25° C. am 6en Keimungstage pro Stunde frei werdend pro KG. Anfangsgewicht berechnet war, dieser Beobachtung gemäss:

$$\frac{1000}{21.7247} \times 94.30 = \mathit{4341\ Kal.}$$

Nachdem also oben gezeigt ist, wie die Berechnungen ausgeführt wurden, glaube ich, dass es genügen wird bei den übrigen Beobachtungen nur die in einer Tabelle zusammengefassten Resultate zu erwähnen.

Fragt man sich, was man aus nachstehender Tabelle schliessen kann, so zeigt sich erstens, dass die Wärme-Entwickelung während der ersten Keimungsstadien (2en und 3en Tag) weit hinter den späteren Stadien zurück blieb.

Zwischen dem 3en und 4en Tage ist eine plötzliche starke Zunahme der Wärme-Entwickelung zu konstatiren. Wahrscheinlich nahm diese während der folgenden Tage auch noch langsam zu.

Die letzte Zunahme war aber jedenfalls nicht gross und

Temperatur der Umgebung.	Anzahl Kalorien pro Stunde abgegeben, berechnet pro KG. Anfangsgewicht am					
	2en	3en	4en	5en	6en	7en Keimungstage
20°		710.	2143.	2790.		2869.
25°	363.	540.	2938.	2977. 3455.	4341.	
30°			4999. 6313.	6790.		
35°		752.		7326.	7575.	
40°				5689.	6847.	

weil die Unterschiede der Wärme-Entwickelung vom 4en bis zum 7en Tage verhältnissmässig gering waren, so schien es berechtigt einen Durchschnittswert für diese Keimungs-Periode zu berechnen.

Temperatur der Umgebung	Anzahl Kalorien pro Stunde abgegeben, berechnet pro KG. Anfangsgewicht am				
	4en	5en	6en	7en Keimungstage	Durschnittswert
20°	2143.	2790.		2869.	*2601.*
25°	2938.	2977. 3455.	4341.		*3428.*
30°	4999. 6313.	6790.			*6034.*
35°		7326.	7575.		*7450.*
40°		5689.	6847.		*6268.*

In dieser Tabelle zeigt sich ein starker Einfluss der Temperatur auf die Wärme-Entwickelung. Mit einer Steigerung von 10° nahm die Menge entwickelter Wärme mehr als 2 mal an Grösse zu. Bei 40° aber hatte die Wärme-Entwickelung abgenommen, ein Beweis des schädlichen Einflusses dieser Temperatur. Dieser schädliche Einfluss zeigte sich auch in der Tatsache, dass, wenn man mit den Ablesungen bei 40° fortfuhr, nachdem ein Maximum Ausschlag erreicht war, dieser nach einigen Stunden allmählig ein wenig abgenommen hatte. Um ungefähr 4 Uhr nachmittags am 5en Keimungstag war die berechnete Wärme-Entwickelung pro KG. Anfangsgewicht 5689 Kal., während sie um ungefähr 10 Uhr Abends bei derselben Beobachtung bis auf 5043 Kal. pro Stunde gefallen war.

Wurde die Beobachtung bei 30° auch so lange fortgesetzt, so blieb der Maximum-Ausschlag Stunden lang beinahe konstant, es war also eine merkliche Änderung der Wärme-Entwickelung nicht zu konstatiren.

Ein Einfluss der Temperatur auf die Keimungswärme am 2en und 3en Tage war nicht zu konstatiren. Weil diese Werte so gering waren, wurde der Einfluss der verschiedenen Fehlerquellen verhältnissmässig um so grösser; ein eventueller Einfluss der Temperatur war hier also nicht mehr fest zu stellen. Eben darum habe ich für diese jüngsten Stadien auch nur wenige Bestimmungen ausgeführt.

Schliesslich sollte die Anzahl Kalorien, die als Wärme pro Stunde pro KG. Anfangsgewicht an die Umgebung abgegeben wurde, mit dem Energieverlust verglichen werden, auf den aus der Verbrennungswärme geschlossen wurde.

Dieser Vergleich war nur für eine Temperatur von 20° C. zu machen, weil die Keimung immer bei dieser Temperatur stattgefunden hatte, somit hatte die Verbrennungswärme auch nur Beziehung auf die Prozesse bei dieser Temperatur.

Keimung bei 20° C.	Energieverlust pro Stunde pro KG. Anfangsgewicht	
	als Wärme-Abgabe	berechnet mittelst der Verbrennungswärme.
Am 2. Tage		83 Kal. [1]
„ 3. „	710 Kal.	1417 „
„ 4. „	2143 „	2250 „
„ 5. „	2790 „	3833 „
„ 6. „		4000 „
„ 7. „	2869 „	7500 „

Die totale Menge der, bei der Keimung freigewordenen, chemischen Energie übertraf also immer die als Wärme an die Umgebung übertragene Energiemenge. Ein Teil dieser bei der Keimung freigewordenen Energie war also offenbar zu andern Zwecken (Osmose etc.) angewandt, also nicht ausschliesslich zur Wärmeabgabe.

Nur für den zweiten Tag war dies fraglich; die Wärme-Entwickelung an diesem Tage war nicht festgestellt worden. Der vermittelst der Verbrennungswärme berechnete Energieverlust war aber in diesem Stadium so gering, dass die Wärme-Entwickelung in diesem Augenblick möglicherweise die erstgenannte Energiemenge übertraf.

Wenn es sich bei späteren Untersuchungen vielleicht zeigen würde, dass dies wirklich der Fall wäre, so würde die Erklärung auch auf der Hand liegen. Im Anfang der Keimung wird nämlich hauptsächlich Imbibition stattfinden; die Wärme-Entwickelung braucht hier also auch nicht unbedingt mit chemischen Umsetzungen verbunden zu sein.

Die grosse, mit Hülfe der Verbrennungswärme berechnete Zunahme des Energieverlusts am 6. und 7. Tage trat bei der Wärme-Entwickelung nicht zu Tage.

[1] Siehe Seite 381.

Freigewordene Energie, aus der Menge ausgeatmeter Kohlensäure berechnet.

Will man die Bildungswärme der ausgeatmeten Kohlensäure berechnen, so hat man erstens zu bedenken, durch die Oxydation welcher Grundstoffe diese entstanden sein kann. In keimenden Weizenkörnern ist wahrscheinlich hauptsächlich Stärke das Atmungsmaterial gewesen.

Die Verbrennungswärme von 1 Gr. Stärke ist 4182.5 Kal.

Bei der Verbrennung von Stärke entsteht aus 162 Gr. Stärke 264 Gr. Kohlensäure. Die Bildungswärme von 1 Gr. Kohlensäure aus Stärke ist $\frac{162}{264} \times 4182.5 = 2565$ Kal. und von 1 mGr. CO_2 2.56 Kal.

Zieht man es vor Glukose als Ausgangspunkt für den Atmungsprozess zu wählen, was in spätern Keimungsstadien auch gewiss richtiger ist, so macht das in den Berechnungen nur einen sehr kleinen Unterschied.

180 Gr. Glukose liefert bei der Verbrennung 264 Gr. CO_2, während ihre Verbrennungswärme 3742.6 Kal. pro Gr. ist.

Die Bildungswärme von 1 Gr. CO_2 aus Glukose ist also $\frac{180}{264} \times 3742.6 = 2552$ Kal. oder 2,55 Kal. pro mGr. CO_2, während sie aus Stärke 2.56 ist. Für die Resultate hat diese Korrektion also in der Praxis keine Bedeutung.

Nun musste man also noch Angaben in Bezug auf der Atmung keimender Weizenkörner bei verschiedenen Temperaturen und verschiedener Keimungsdauer zur Verfügung haben.

Ich bedaure es sehr, dass ich nicht bei jedem Experiment

auch die Menge ausgeatmeter Kohlensäure gemessen habe; dies wäre bei der benutzten Installation leicht ausführbar gewesen, was zweifellos ein grosser Vorteil dieser Methode ist. Dazu hätten zwischen dem Gefässe und dem Aspirator zwei Pettenkofersche Röhre mit $Ba(OH)_2$ befestigt werden müssen; man hätte dann jede Stunde den, am Gewicht der abgegebenen Kohlensäure berechneten, kalorischen Effekt direkt mit der, von den selben Weizenkörnern abgegebenen, Menge Wärme vergleichen können. Dies ist leider nicht geschehen, und ich war genötigt die Angaben anderer Forscher zu benutzen.

Die Vergleiche waren jedoch sehr schwer auszuführen, da die Bedingungen bei der Keimung und bei den Beobachtungen anderer Forscher bedeutend von denjenigen abwichen, welche ich bei meinen Beobachtungen benutzt hatte. Darum ist es auch nur mit grosser Reserve, dass ich folgende Vergleiche ziehe.

Es war ratsam, betreff der Atmung von Keimpflanzen an erster Stelle die Untersuchungen Kuyper's: „Über den Einfluss der Temperatur auf die Atmung der höheren Pflanzen" zu benutzen. (Recueil des Travaux Botaniques Néerlandais. Vol. VII 1910.)

Auf Seite 232—234 findet man hier eine Tabelle über den Verlauf der Atmung von keimendem Weizen in einer Temperatur zwischen 0° und 50°. Aus zwei Gründen lieferten diese Angaben jedoch ungenügendes Vergleichsmaterial für meine Experimente, so genau und vollständig sie sonst auch sein mögen.

Erstens beziehen sich Kuyper's Beobachtungen über die Atmung nur auf ein bestimmtes Keimungsstadium (die Weizenkörner wurden 1 Tag in Wasser geweicht und keimten nachher 3 Tage auf Sägemehl bei ungefähr 20°). Wie sich nun aus den obigen Beobachtungen der Verbrennungswärme und Wärme-Entwickelung ergeben hatte, hingen die energetischen Prozesse eng mit der

Keimungsdauer zusammen. Der Vergleich mit einem einzigen Stadium war somit sehr unvollständig.

Die zweite Schwierigkeit war die, dass die Atmungsintensität für ein Gewicht von 50 Gr. *Keimpflanzen* angegeben worden ist. Diese wurden nur beim Anfang der Beobachtungen gewogen, nachdem sie mit Filtrirpapier getrocknet waren; das Anfangsgewicht vor der Keimung ist jedoch nicht angegeben.

Dieser Sachverhalt machte den Vergleich mit meinen Resultaten sehr schwer, weil sowohl die Verbrennungswärme, als auch die Wärme-Entwickelung pro KG. Anfangsgewicht berechnet waren; weil die Bestimmungen für verschiedene Keimungsstadien ausgeführt wurden, habe ich gemeint dieses Anfangsgewicht als den am wenigsten willkürlichen Vergleichungspunkt wählen zu müssen.

Fräulein E. Talma hat, im Botanischen Institut zu Utrecht, versucht diese Schwierigkeit zu überwinden und hat in der von Kuyper beschriebenen Weise eine Reihe Beobachtungen ausgeführt, jedoch mit den für meinen Fall nötigen kleinen Änderungen und Ergänzungen in der Berechnung.

Sie bestimmte den Verlauf der Atmung bei 25° C., während der ersten sieben Tage der Keimung. Die 250, zur Beobachtung bestimmten Weizenkörner wurden vor der Keimung gewogen, damit die Atmung nachher pro KG. Anfangsgewicht umgerechnet werden konnte.

Es zeigte sich in der Tat, dass hier, wie es auch mit dem, aus der Verbrennungswärme berechneten Energieverlust, und mit der Wärme-Entwickelung der Fall gewesen war, bei fortschreitender Keimung eine starke Zunahme der Atmung statt fand und dass diese Zunahme verhältnissmässig wieder am stärksten während der ersten zwei Tage der Keimung war.

Diese Abhängigkeit der Atmung vom Keimungsstadium hatte sich früher auch schon aus den Beobachtungen

Keimungsdauer.	mGr. CO_2 pro Stunde ausgeatmet bei 25° C. berechnet pro KG. Anfangsgewicht.	
		Durchschnitt.
Am 2. Tage	826—843	834
„ 3. „	1463—1507	1485
„ 4. „	2421—2483	2452
„ 5. „	2689—2690	2690
„ 6. „	3426—3477	3452
„ 7. „	3891—3975	3933
„ 8. „	4240	4240

Mayer's (1875) und Rischawi's (1876) bezüglich desselben Gegenstandes ergeben.

Aus obiger Tabelle kann der zugehörige kalorische Effekt berechnet werden. Wie schon gesagt wird gerechnet, dass pro mGr. CO_2 2.56 Kal. frei geworden sind. Bei der Berechnung wurde der Durchschnitt der ausgeatmeten Menge Kohlensäure genommen. Zum Vergleich ist neben diesen Zahlen die, in verschiedenen Keimungsstadien bei 25° C. entwickelte, Wärmemenge angegeben. (Siehe Seite 402).

Keimungsdauer.	Energieverlust während der Keimung bei 25° C. berechnet mittelst	
	der Menge ausgeatmeter Kohlensäure.	der Wärme-Entwickelung.
Am 2. Tage	2135 Kal.	363 Kal.
„ 3. „	3802 „	540 „
„ 4. „	6277 „	2938 „
„ 5. „	6886 „	3216 „
„ 6. „	8837 „	4341 „
„ 7. „	10068 „	
„ 8. „	10854 „	

Aus diesen Zahlen kann man schliessen, dass die Atmungsenergie nur zum Teil als Wärme an die Umgebung abgegeben wurde, während ein sehr grosser Teil als solche für die Pflanze aufgehoben wurde.

Es fällt aber auch noch etwas anderes bei der Vergleichung der Atmungsenergie mit der Wärme-Entwickelung auf. Aus der von Kuyper angegebenen Tabelle betreffs der Atmungsintensität bei verschiedenen Temperaturen zeigt sich von 30° bis auf 35° eher eine Abnahme der Atmungsintensität, als eine Steigerung derselben, während die Wärme-Entwickelung sich, nach meinen Beobachtungen, bei 35° C. noch bedeutend steigerte, und erst bei 40° eine Abnahme zeigte.

Die Proportionalität zwischen dem Grade der Wärme-Entwickelung und dem der Atmung ist also jedenfalls keine vollkommene; sehr wahrscheinlich liegt das Optimum der Atmung niedriger als das der Wärme-Entwickelung. Dies stimmt, wie mir scheint, auch sehr gut mit den von Wolkoff und Mayer bei der Untersuchung über den Einfluss der Temperatur auf Atmung und Wachstum erhaltenen Resultaten überein. Diese Erscheinungen zeigten sich bei verschiedenen Temperaturen nicht immer als proportionell. Bis zu einer bestimmten Höhe steigern sich beiden mit der Temperatur; das Optimum der Atmung liegt aber höher als das des Wachstums; bei ± 35° C. nimmt die Atmung ab, während das Wachstum bereits eher nachgelassen hat.

Bei 35° wird also die bei der Atmung frei gewordene Menge Energie etwas abnehmen; das Wachstum oder mit anderen Worten, die verschiedenen synthetischen Prozesse sind schon eher bedeutend verlangsamt.

Die Menge Energie, welche bei vollkommener Proportionalität von Atmung und Wachstum immer für einen bestimmten Teil zu diesen synthetischen Prozessen angewandt würde, ist also verhältnissmässig bedeutend geringer

geworden, während beim verlangsamten Wachstum weniger Energie zu verschiedenen osmotischen Zwecken oder zur Überwinding von Widerständen erforderlich ist.

Es ist also sehr begreiflich, dass die Wärme-Entwickelung in der Nähe von 35° stärker zunimmt als die Atmung und dass das Optimum der ersteren höher liegt.

Vergleiche mit den Angaben in der Literatur.

Es sind in der Literatur nur drei Forscher bekannt, nämlich Bonnier, Rodewald und Peirce, welche sich damit beschäftigt haben, die Menge der von Pflanzen oder Pflanzenteilen entwickelten Wärme zu messen.

Bonnier hat dies mit Hilfe eines Kalorimeters getan, in welchem die Keimung statt fand. Die Temperaturerhöhung des Wassers im Kalorimeter war ein Mass für die Keimungswärme.

Zuerst sollen hier diese Untersuchungen Bonnier's besprochen werden, besonders der Abschnitt in dem die Wärme-Entwickelung bei der Keimung von Getreide behandelt wird.

In den Tabellen, die sich hierauf beziehen, ist die Zahl der Kalorien als Wärme *pro Minute* von *1 K.G. Keimpflanzen* entwickelt, angegeben. Es versteht sich, dass das Gewicht der keimenden Samen während der Keimung durch die Imbibition stark wächst; es erreicht schliesslich mehr als zweimal das Anfangsgewicht.

Um die von Bonnier bestimmten Zahlen mit den meinigen vergleichen zu können, hätte ich sie mit zwei multiplizieren müssen. Diese Berechnung habe ich jedoch nicht ausgeführt; dagegen multiplizierte ich mit 60, damit die Menge Kalorien pro KG. pro *Stunde* gegeben wäre.

Bonnier hat also auch die Wärme-Entwickelung während der Keimung von Weizen bei verschiedenen Temperaturen bestimmt, und fand dafür die folgenden Werte:

Beim Anfang der Keimung bei 0°	0 Kal. — 0 Kal.
„ „ „ „ „ 5,7°	180 „ — 360 „
„ „ „ „ „ 10,5°	720 „ — 900 „
„ „ „ „ „ 15,8°	2100 „ —1920 „

Diese Werte scheinen mir zu hoch. Ein Vergleich mit meinen Resultaten ist nicht so leicht zu ziehen, weil Bonnier erstens die Wärme-Entwickelung ausschliesslich bei diesen niedrigen Temperaturen bestimmt hat, während meine Bestimmungen sich gerade von 20° aufwärts beziehen, und zweitens weil es ziemlich ungewiss ist, was man unter „dem Anfang der Keimung" versteht.

Bonnier beschreibt dieses Stadium als „der Anfang der Keimung, bei der Erscheinung des Würzelchen's". Wahrscheinlich stimmt dieses Stadium mit einer eintägigen Keimung bei 20° überein, bezieht sich also auf den zweiten Tag de Keimung.

In diesem Stadium fand ich bei 20° weniger als 710 Kal, (Siehe Seite 402). Bei einer Temperatur von 15,8° und niedriger würde man also erwarten, dass viel weniger Wärme produzirt würde. Dazu kommt noch dass sich, wie gesagt, meine Zahlen auf das Anfangsgewicht beziehen, von welchem 1 KG. also ungefähr mit 2 KG. Keimpflanzen übereinstimmt. Meinen Bestimmungen zufolge würde die pro KG. Keimpflanzen entwickelte Menge Wärme bei 15,8° also jedenfalls noch bedeutend weniger als 355 Kal. sein, während Bonnier diese auf 1920 und 2100 Kal. bestimmt.

Ausserdem hat Bonnier die Abhängigkeit der Wärme-Entwickelung von der Keimungsdauer festgestellt. Die Resultate dieser Bestimmungen werden in der folgenden Tabelle angegeben. Bei einigen Stadien ist angegeben, mit welchen Stadien meiner Experimente diese ungefähr übereinstimmen.

Bei 10,5° Weizen.	
12 Stunden in Wasser geweicht.	120 Kal.
Das Würzelchen tritt zum Vorschein.	3120 „
„ „ ist 1.5 cM. lang (am 3. Keimungstage).	1200 „
„ „ ist 3,5 cM. lang (am 4. Keimungstage).	1680 „
Das Koleoptyl ist 8 cM. lang (am 7. Keimungstage).	960 „

Aus dieser Tabelle kann man nicht auf eine anhaltende Zunahme der Wärme-Entwickelung bei fortschreitender Keimung schliessen, wie ich das bei meinen Experimenten konstatirt habe. Bonnier findet zuerst eine besonders starke Zunahme, dann eine starke Abnahme und schliesslich eine Schwankung.

Hier füge ich noch eine, von Bonnier aufgestellte Tabelle bei, wo er die als Wärme (Q_m) abgegebene Energiemenge mit der aus der Kohlensaure-Abgabe (Q_c) und Sauerstoff-Aufnahme (Q_o) berechneten Menge vergleicht. In diesem Falle wurde Gerste für die Beobachtung gewählt.

16°. Gerste.	Q_m	Q_c	Q_o
12 Stunden in Wasser geweicht	300 Kal.	180 Kal.	180 Kal.
Das Würzelchen tritt zum Vorschein	3720 „	1740 „	2700 „
Hauptwurzel ± 3 mM. lang. .	2400 „	1500 „	1860 „
Koleoptyl 8 cM. lang	900 „	720 „	720 „

Aus diesen Zahlen würde man schliessen, dass die als Wärme abgegebene Menge Kalorien bei weitem diejenige übertrifft, die aus der Menge ausgeatmeter Kohlensäure und aufgenommenen Sauerstoffs berechnet werden kann.

Wenn man aber annimmt, dass, wie oben gezeigt wurde, die Wärme-Entwickelung von Bonnier wirklich bedeutend zu hoch taxirt wurde, dann wird man die letzte Schlussfolgerung auch nicht unterschreiben können. Sind in obenstehender Tabelle die Zahlen der ersten Spalte viel zu gross, so kann man auch nicht auf einen Überschuss der Atmungsenergie schliessen, was jedenfalls sehr unwahrscheinlich ist.

Aus obigen Bemerkungen zeigt sich der grosse Unterschied zwischen den Resultaten Bonnier's und den meinigen. Ein Nachteil seiner Methode ist jedenfalls, dass die Keimpflanzen während der Untersuchung in einem abgeschlossenen Raume verweilten, wo eine allmählige Anhäufung von Kohlensäure statt finden musste.

Weil aber der Vergleich der Resultate oft nur auf Umwegen und nur annäherend zu ziehen war, und weil auch meine Resultate vielleicht in mancher Hinsicht etwas ungewiss sind, so habe ich die vorhergehenden Tatsachen nur angedeutet, ohne sie weiter in Erwägung zu ziehen.

Sind also einerseits die von Bonnier gefundenen Werte der Wärme-Entwickelung wahrscheinlich zu hoch, andererseits sind die von Peirce festgestellten Werte, meiner Ansicht nach, zu niedrig.

Peirce liess die Keimung in Dewar'schen Gefässen stattfinden und berechnete vermittelst der Temperatursteigerung im Innern die Menge freiwerdender Wärme. Die Gefässe mussten also vorher geaicht werden, damit ihre Wärmekapazität bekannt war, zweitens aber musste auch eine Korrektion für den Austausch in Rechnung gebracht werden, und diese Korrektion musste proportionell mit dem Temperaturunterschied des Gefässes und der Umgebung sein. Die Ausstrahlung ist in einem Dewar'schen Gefässe wohl sehr gering, immerhin besteht sie. Peirce brachte wohl eine Korrektion an; dieselbe scheint mir aber zu gering. Dass diese Korrektion nämlich mit

dem Temperaturunterschied des Gefässes und der Umgebung zunahm, zeigt sich weder aus der graphischen Vorstellung, noch aus den Berechnungen.

Die Temperaturmessungen wurden 7 Tage lang fortgesetzt; der siebente Teil der ganzen, während dieser Zeit entwickelten Wärmemenge wurde von Peirce als die Menge pro Tag entwickelter Wärme angesehen. Hier wurde also vorausgesetzt, dass die Wärme-Entwickelung während der Dauer der Beobachtungen (7 Tage) konstant sei, was natürlich auch schon sehr zweifelhaft ist wegen der fortwährenden Temperatursteigerung im Laufe der Beobachtungen.

Peirce experimentirte nun ausschliesslich mit keimenden Erbsen, sodass ein direkter Vergleich mit meinen eignen Resultaten ausgeschlossen ist; aus den Untersuchungen von Bonnier hat sich aber deutlich ergeben, dass die Wärme-Entwickelung bei der Keimung von Erbsen und Weizen ungefähr von gleicher Grösse ist. Die Wärme-Entwickelung bei der Keimung von Erbsen ist eher etwas höher als beim Weizen, und nicht umgekehrt. Ein Vergleich mit meinen Resultaten wird, was dies anbelangt, also jedenfalls nicht ungünstig für Peirce sein können.

Peirce fand im günstigsten Falle, am 4. Tage der Keimung eine Wärme-Entwickelung von 8.55 Kal. pro KG. Anfangsgewicht pro Minute, also 513 Kal. pro Stunde. Beim Studium der von ihm gegebenen Tabellen kommt man zu dem Schlusse, dass die Temperatur an diesem Tage im Dewar'schen Gefässe ungefähr bis auf ± 30° C. gestiegen ist.

Am 4. Keimungstage des Weizens fand ich bei 30° eine Wärme-Entwickelung von ungefähr 5600 Kal. pro Stunde pro KG. Anfangsgewicht berechnet (Siehe Seite 402).

Der Unterschied zwischen 513 Kal. und 5600 Kal. ist natürlich sehr bedeutend. Die von Peirce berechneten Werte scheinen mir tatsächlich zu klein zu sein, und das

wohl hauptsächlich wegen der zu kleinen Korrektion, welche für den Wärmeaustausch in Rechnung gebracht worden war.

Die Untersuchungen Rodewald's betreff der Wärme-Entwickelung beziehen sich auf Äpfel und kommen hier also zum Vergleich nicht in Betracht.

Ausserdem ist noch in den Publikationen Rodewald's und Wilsing's Vergleichsmaterial für die bei der Bestimmung der Verbrennungswärme erhaltenen Resultate, zu finden.

Die beiden Forscher haben sich ausschliesslich mit Trifolium pratense beschäftigt. Deshalb kann ein Vergleich also nur unter Vorbehalt gemacht werden.

Die folgende Tabelle gibt die Verbrennungswärme von Trifolium pratense an, pro gr. Trockengewicht vor der Keimung berechnet und bei verschiedenen Keimungsstadien bestimmt.

	Nach Bodewald.		Nach Wilsing.	
Vor der Keimung	4916		5052	Unterschied 295
Nach 3. tägiger Keimung		Unterschied 383	4757	„ 238
„ 5. „ „	4533		4519	„ 232
„ 7. „ „		„ 1105	4287	„ 211
„ 9. „ „	3428		4076	

Rodewald hat also bei fortschreitender Keimung einen schnell zunehmenden Energieverlust gefunden, während bei den Beobachtungen Wilsing's der Energieverlust während der Keimung ungefähr proportionell mit der Zeit war.

Meine Resultate haben also eine viel grössere Übereinstimmung mit denen Rodewald's als mit denen Wilsing's.

Aber wie gesagt ist ein wirklicher Vergleich des Energieverlustes nicht möglich, da die Untersuchungen nicht an dem gleichen Material vorgenommen worden sind.

Zusammenfassung der Resultate.

Bei der Keimung von Weizenkörnern ist folgendes klar gelegt worden:

Während der ersten 7 Tage der Keimung nimmt der *Energieverlust* immer an Grösse zu.

Diese Zunahme ist verhältnissmässig am 3. Tage am stärksten.

Während der beiden ersten Tage ist der Energieverlust sehr gering, dann findet hauptsächlich Imbibition statt.

Bei fortschreitender Keimung nimmt die *Wärme-Entwickelung* an Grösse zu.

Diese Zunahme ist verhältnissmässig am 3. und 4. Tage am stärksten.

Die Grösse der Wärme-Entwickelung ist von der Temperatur der Umgebung abhängig.

Bis zu 35° C. nimmt die Wärme-Entwickelung mit der Temperatur zu.

Für einen Temperaturunterschied von 10° nimmt die Wärme-Entwickelung mehr als 2 Mal an Grösse zu.

Bei 40° hat die Wärme-Entwickelung abgenommen.

Die vermittelst Bestimmung der Verbrennungswärme gefundene Energieverlust während der Keimung bei 20° C. übertrifft immer die Energiemenge, welche bei derselben Temperatur als Wärme an der Umgebung abgegeben worden ist.

Die *Atmung* nimmt während der Keimung an Grösse zu (Diese Bestimmung galt nur für eine Temperatur von 25° C).

Diese Zunahme is Verhältnissmässig während der beiden ersten Tage am stärksten.

Bei 25° C. ist während der ersten sechs Keimungstage die als Wärme abgegebene Kalorienzahl immer geringer als die durch Atmung frei gewordene Energie.

Die Wärme-Entwickelung erreicht oberhalb 35° C. ihr Optimum.

Dieses Optimum liegt höher als das der Atmung.

Eine vollkommene Proportionalität zwischen Wärme-Entwickelung und Atmung besteht also nicht.

NACHSCHRIFT.

Die auf S. 386 genannte Zeichnung ist Tab. IV.

LITERATURVERZEICHNIS.

Barnes. C. R. The Theory of Respiration. Bot. Gazette, Vol. XXXIX, 1905.

Becquerel. H. Observations sur les moyens à employer pour évaluer la température des végétaux. Ann. d. Sc. nat. 2e série, Bot. T. XII, 1839.

Beek. A. van en Bergsma. C. A. Observations thermo-électriques sur l'élévation de température des fleurs de Colocasia odora. Encyclopédie Méthodique Bot. T. 3. Paris, 1838.

Bonnier. G. Sur la quantité de chaleur dégagée par les végétaux pendant la germination. Bulletin de la Société Bot. de France XXVII, 1880.

Bonnier. G. Recherches sur la chaleur végétale. Ann. d. Sc. nat. 7e série, Bot. T. XVII, 1893.

Borodin. J. Physiologische Untersuchungen über die Athmung der beblätterten Sprosse. Arbeiten der St. Petersburger Gesellsch. der Naturforscher. Bd. VII, 1876. (Russisch). Referat in Just. Bot. Jahresber. Bd. IV, Abt. 2, 1876.

Borodin. J. Untersuchungen über die Pflanzenathmung. Mémoires de l'Acad. impériale des Sc. de St. Petersburg. 7e série, T. XXVIII, no. 4, 1881.

Dutrochet. H. J. Recherches sur la température propre des végétaux. Ann. d. Sc. nat. 2e série, Bot. T. XII, 1839.

Dutrochet. H. J. Sur la chaleur propre des êtres vivans à basse température. Ann. d. Sc. nat. 2e série

Bot. T. XIII, 1840 und Ann. d. Sc. nat. 2e série Zoolog. T. XIII, 1840.

Eriksson. J. Ueber Wärmebildung durch intramolekulare Athmung der Pflanzen. Untersuchungen a. d. Bot. Inst. zu Tübingen. Bd. I, Heft 1, 1881.

Famintzin. A. Stoffwechsel und Umwandlung der Energie in den Pflanzen. Schriften d. St. Petersb. Akad. d. Wiss. 8⁰. St. Petersburg, 1883. (Russisch). Referat in Bot. Centralbl. Bot. XVII, no. 4, 1884.

Goeppert. H. R. Ueber die Wärme-Entwickelung in den Gewächsen und die Erscheinungen beim Gefrieren derselben. Breslau, 1830.

Goeppert. H. R. Ueber Wärme-Entwickelung in der lebenden Pflanze. Vortrag gehalten zu Wien 18 Sept. 1832, in der Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte.

Halder. F. A. Beobachtungen über die Temperatur der Vegetabiliën. Inaugural-Dissertation 1826. (unter Präsidium v. G. Schübler, Tübingen.)

Höber. R. Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe. Leipzig. Verl. v. Wilh. Engelmann 1902.

Hunter. J. Experiments on Animals and Vegetables, with respect to the Power of producing Heat. Philos. Transactions, Vol. LXV, 1775.

Hunter. J. Of the Heat of Animals and Vegetables. Philos. Transactions. Vol. LXVIII, 1778.

Kuyper. J. De invloed der temperatuur op de ademhaling der hoogere planten. Proefschrift. J. van Boekhoven. Utrecht, 1909.

Kuyper. J. Ueber den Einfluss der Temperatur auf die Atmung der höheren Pflanzen. Recueil des Travaux Botaniques Néerlandais, Vol. VII, 1910.

Lamarck. J. B. de. Encyclopédie Méthodique. III, p. 9. Paris, 1789.

Leick. Erich. Untersuchungen über die Blütenwärme der Araceen. Greifswald, Verl. von Bruncken & Co., 1910.

Leick. Erich. Ueber das thermische Verhalten der Vegetations-organe. Mitt. des naturwiss. Vereins für Neuvorpommern und Rügen. Jahrg. 43, 1911.

Leick. Erich. Ueber den Temperaturzustand verholzter Achsenorgane. Mitt. d. naturw. Vereins f. Neuvorp. und Rügen. Jahrg. 44, 1912.

Mayer. A. Ueber den Verlauf der Athmung beim keimenden Weizen. Landwirtsch. Versuchs-Stationen. Bd. XVIII, 1875.

Mayer. A. Die Abhängigkeit der Pflanzenathmung von der Temperatur. Landwirtsch. Versuchs-Stationen, Bd. XIX, 1876

Mayer. A. Siehe Wolkoff.

Molisch. H. Ueber hochgradige Selbsterwärmung lebender Laubblätter. Bot. Zeitung. Jahrg. LXVI, Abt. 1, 1908.

Molisch. H. Ueber die Selbsterwärmung von Pflanzen in Dewargefäszen. Zeitschr. f. Bot. Jahrg. VI, Heft 4, 1914.

Nathansohn. A. Der Stoffwechsel der Pflanzen. Verl. von Quelle & Meyer. Leipzig, 1910.

Pfeffer. W. Das Wesen und die Bedeutung der Athmung in der Pflanze. Landw. Jahrb. Bd. VII, 1878.

Pfeffer. W. Studien zur Energetik der Pflanze. Abh. der math. phys. Classe der Königl. Sächs. Gesellsch. der Wissensch. Bd. XVIII, no. 3, 1892.

Peirce. G. J. A new respiration Calorimeter. Bot. Gazette, XLVI, 1908.

Peirce. G. J. The Liberation of Heat in Respiration. Bot. Gazette, LIII, 1912.

Puriewitsch. K. Physiologische Untersuchungen über Pflanzenathmung. Jahrb. f. wiss. Bot. XXXV, 1900.

Raspail. F. V. Nouveau Système de Physiologie végétale et de Botanique. Vol. II, p. 218—229, 1837, Paris.

Reinke. J. Autoxydation in der lebenden Pflanzenzelle. Bot. Zeitung, Jahrg. XLI. 1883.

Rischawi. L. Einige Versuche über die Athmung der Pflanzen. Landw. Versuchs-Stationen, Bd. XIX, 1876.

Rodewald. H. Ueber die Wechselbeziehungen zwischen Stoffumsatz und Kraftumsatz im keimenden Samen. Journal für Landwirtschaft, 1883.

Rodewald. H. Quantitative Untersuchungen über die Wärme und Kohlensäure-Abgabe athmender Pflanzentheile. Jahrb. f. wiss. Bot. XVIII, 1887.

Rodewald. H. Untersuchungen über den Stoff- und Kraft-Umsatz im Athmungsprocess der Pflanze. Jahrb. f. wiss. Bot. XIX, 1888.

Rodewald. H. Weitere Untersuchungen über den Stoff- und Kraft-Umsatz im Athmungsprocess der Pflanze. Jahrb. f. wiss. Bot. XX, 1889.

Sachs. J. v. Vorlesungen über Pflanzen-Physiologie. Verl. v. Wilh. Engelmann, 1887.

Saussure. Th. de. De l'Action des Fleurs sur l'Air et de leur Chaleur propre. Ann. de Chimie et de Physique. T. 21, 1822.

Schöpf. D. Ueber die Temperatur der Pflanzen. Der Naturforscher XXIII, 1788.

Schübler. G. Siehe Halder.

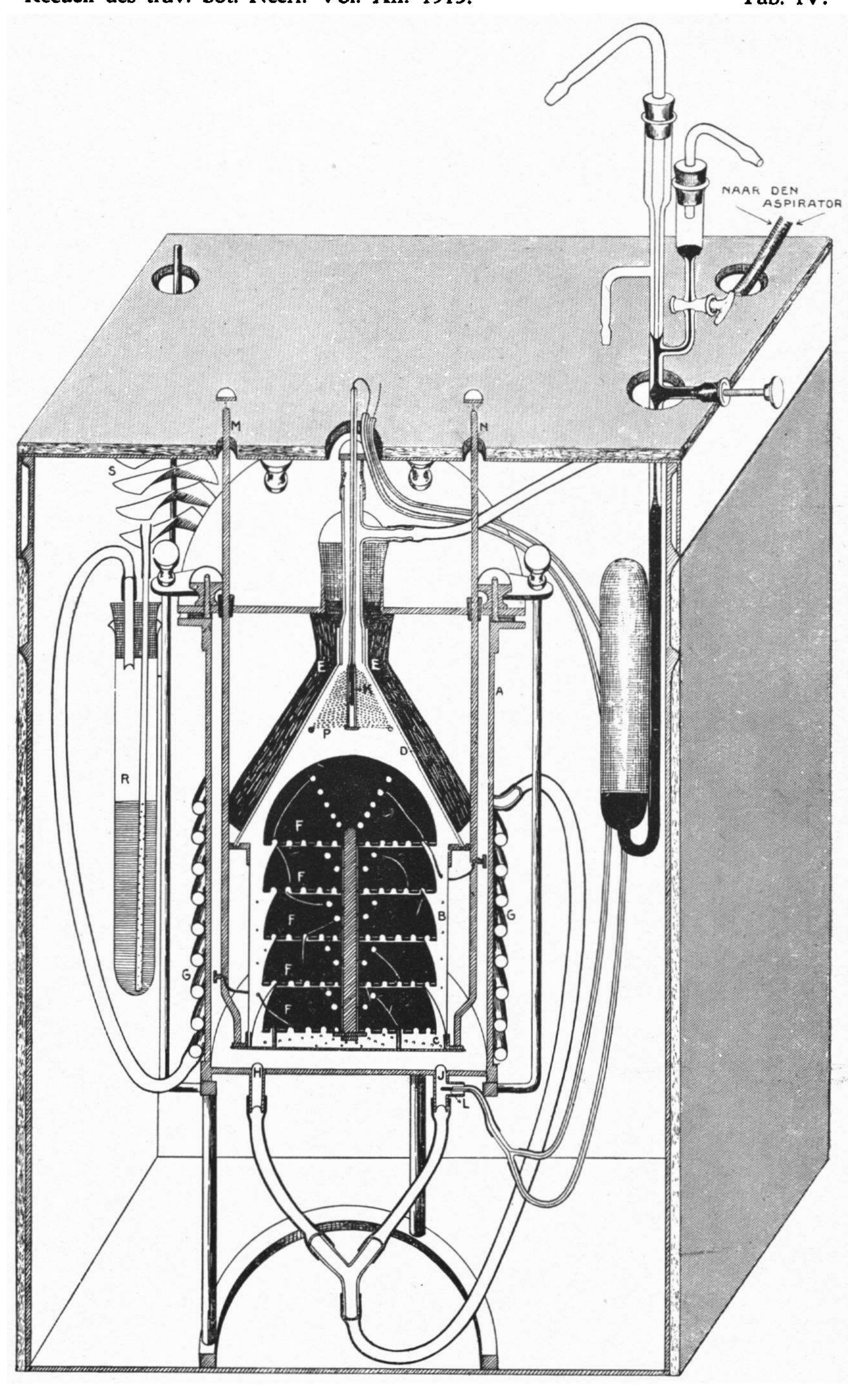
Senebier. J. Physiologie Végétale. T. III, 1800.

Treviranus. L. C. Entwickelt sich Licht und Wärme beim Leben der Gewächse? Zeitschr. für Physiologie, III, 1829.

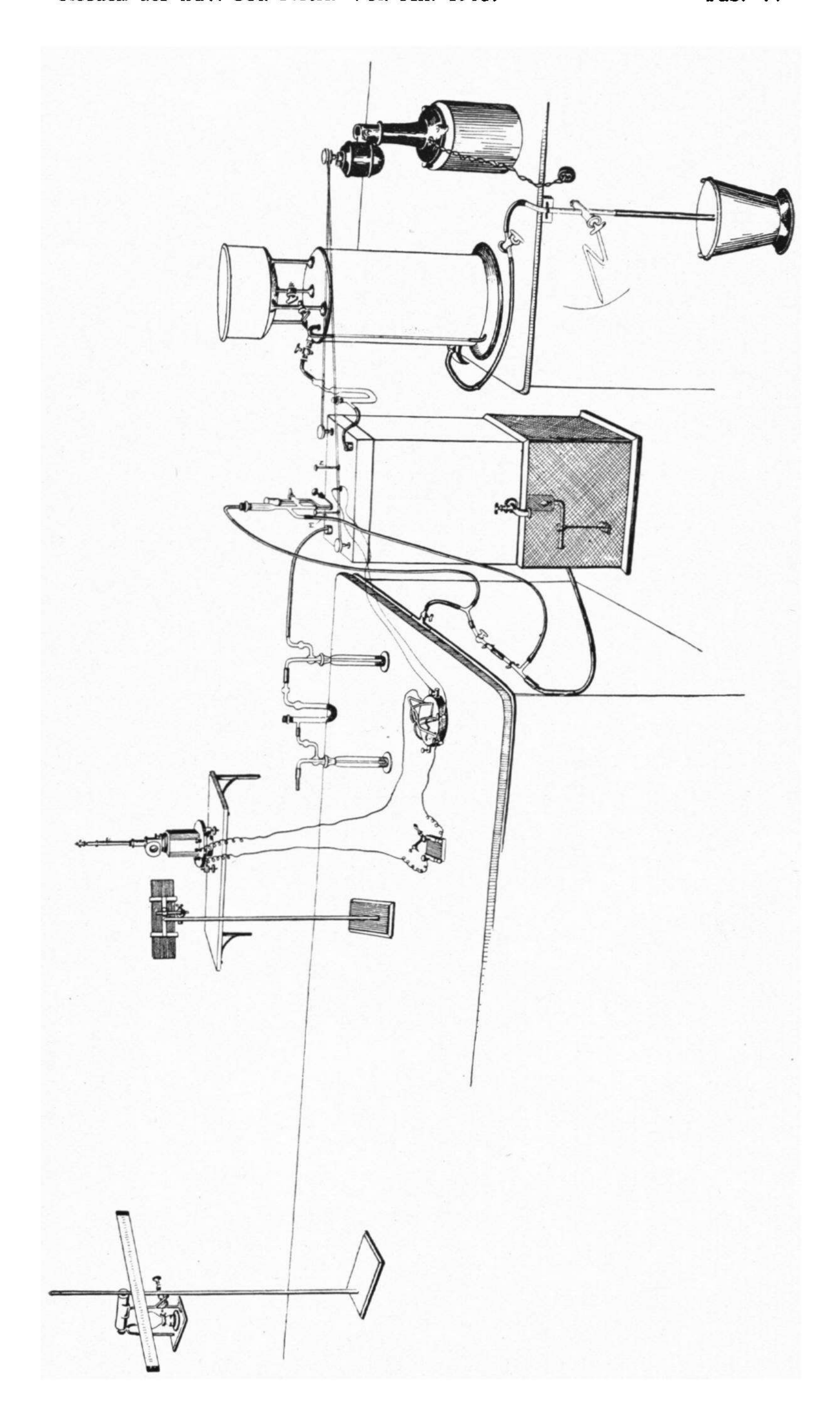
Vrolik G. en Vriese. W. H. de. Tijdschrift voor Nat. Gesch. en Physiologie. II, 1835.

Vrolik G. en Vriese. W. H. de. Nouvelles expériences sur l'élévation de température du spadice d'une Colocasia-odora (Caladium odorum) faites au jardin botanique d'Amsterdam. Ann. d. Sc. Nat. 2e série. Bot. T. XI. 1839.

Vrolik G. en Vriese. W. H. de. Nouvelles expériences sur les changemens que subit l'atmosphère



$^1/_4$ der wahren Grösse.



pendant le développement de la température élevée dans un spadice de Colocasia odora, faites dans le jardin botanique d'Amsterdam. Ann. d. Sc. Nat. 2e série. Bot. T. XIV, 1840.

Wilsing. Stoffumsatz und Kraftumsatz im keimenden Samen. Journal für Landwirtschaft, 1884.

Wolkoff A. von und Mayer. A. Beiträge zur Lehre über die Atmung der Pflanzen. Landw. Jahrb. III, 1874.